



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

VILLE JOKELA  
TERÄSLIITOSTEN MITOITUS JA KUSTANNUSVERTAILU  
Diplomityö

Tarkastaja: professori Markku Heinisuo  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty Rakennetun  
ympäristön tiedekuntaneuvoston kokouk-  
sessa 8. kesäkuuta 2016

# TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLISEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

JOKELA, VILLE: Teräslitosten mitoitus ja kustannuslaskenta

Diplomityö, 99 sivua, 96 liitesivua

Kesäkuu 2016

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Markku Heinisuo

Avainsanat: teräs, liitokset, EN 1993-1-8, mitoitus, kustannuslaskenta

Sweco Rakennetekniikka Oy antoi diplomityön tehtäväksi syksyllä 2015 ja sen tarkoituksena oli tehdä yrityksen teräsosastolle käyttäjäystävällisiä työkaluja Helsingin olympiastadionin perusparannuksen yhteydessä lisättävän teräksisen yleisökatoksen linjaristikon ja niskaristikon liitosvaihtoehtojen mitoitukseen ja kustannuslaskentaan. Työkalujen avulla voidaan valita käytetty liitosvaihtoehto kustannusvaikutuksien perusteella. Katoksen lentokoneen siipeä muistuttava muoto on vaatinut tämän diplomityön ulkopuolisesti tehtyjä tuulitunnelianalyysijä rakenteiden rasiutusten arvioimiseksi. Rakenne altistuu väsymisrasitukselle ja tämä täytyy huomioda myös teräsrakenteiden liitosten rakenteellisessä suunnittelussa.

Liitokseksi oli ehdolla kaksi erilaista liitostyyppiä. Liitosten rakenteellista toimivuutta ja kustannusvaikutuksia arvioitiin. Jotta esitetyt liitosvaihtoehdot olisivat vertailukelpoisia kustannuksiltaan, niiden lujuudellinen käyttöaste tulisi olla likimain sama. Mitoituksen ja kustannusarvioinnin työkaluksi valittiin excel. -taulukko-ohjelmalla tehty laskentapohja. Mitoitus suoritettiin vallitsevan eurokoodin mukaisesti. Vaikka kyseiset liitokset ovat väsyttävän kuormituksen rasittamia, väsymistutkinta on rajattu diplomityön ulkopuolelle ja käytännössä hoidetaan projektissa mukana olevan väsymisasiantuntijan kanssa yhteistyössä. Väsyminen liitoksissa on pääasiallisesti huomioitu jännityshuippuja ja vaurioon johtavia alkusäröjä vähentävillä rakenteellisilla ratkaisuilla. Mitoittamisen ja kustannuslaskennan lisäksi on arvioitu liitosten toteutettavuutta ja asennettavuutta. Toteutettavuudessa arvioidaan kokoonpanon haasteita saada liitos konepajalla valmistettua mittatarkaksi. Tavoitteena on vähentää valmiiksi haasteellisen geometrian tuomia virhemahdollisuuksia. Asennettavuudesta arvioidaan liitosvaihtoehdon vaikutuksia kokoonpanojen kiinnittämiseen.

Diplomityön johtopäätösten ja tarkennetun liitosarvioinnin kautta päätetään kohteessa käytettävä liitos sekä yrityksen mallinnusohjelman tekninen vastaava laatii parametrisen liitoksen käytettyyn mallinnusohjelmaan varsinaisten mallintajien työn helpottamiseksi. Laskentapohja toimii myös kohteen teräsrakennesuunnittelijoille kyseisten liitosten mitoitustyökaluna.

# ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

JOKELA, VILLE: Calculation and cost comparison of steel joints

Master of Science Thesis, 99 pages, 96 Appendix pages

June 2016

Major: Structural engineering

Examiner: Professor Markku Heinisuo

Keywords: steel, joints, EN 1993-1-8, calculation, cost comparison

The subject for the master thesis was given by the Sweco Rakennetekniikka Oy in fall 2015. Its purpose was to make user friendly tools for the companies steel design department to perform steel structure calculations and cost analysis for the proposed joint alternatives during the basic improvement construction of the Helsinki Olympic stadium's steel framed audience canopy. With these tools it would be possible to choose used joint alternative based on its cost effect. Canopies resembles upside down airplane wing and thus has needed separate wind tunnel tests outside of this thesis to estimate structural stresses. Structure is exposed to fatigue inducing wind loads and this has to be taken to a count in the design of the steel joints.

There were two different joint proposes for the same location and their practical usefulness and cost effect was been evaluated. To make joint proposes valid for cost comparison, they had to be roughly in the same structural use stress levels. Excel –table calculation program was made to calculate joint alternatives strengths and costs. Strength calculations were made according to the up-to-date Eurocode. Even thou the joints are under fatigue loading, effects of the fatigue to the calculations were done outside this thesis with the cooperation of the fatigue specialist who are part of the same project. In practical level, fatigue inducing stress spikes has been mitigated in the joints by structural details. As third part for the thesis was to estimate the practical challenges in assembly at the workshop and in erection at the site when using these joints. For the workshop, focus is to design joints to high assembly accuracy. As a goal is to minimize complexity of the joints in already challenging geometry of the structure. Joints alternatives are also compared for their effects at the erection phase.

With the conclusions of the master thesis and the joint calculations comparisons project managers have some idea which joint is used on the project. After this project model supervisor can design a parametric joint for the modeling program used for the steel design. This parametric joint is used by the actual modelers of the steel structure and the strength calculation part of this thesis can be used as a tool by steel designers of the project to estimate the joints capacities.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Sweco Rakennetekniikka Oy:lle syksyn 2015 - kesän 2016 välisenä aikana. Kiitän Sweco Rakennetekniikka Oy:tä haastavasta ja mielenkiintoisesta aiheesta.

Kiitän työni ohjaajia Juha Kukkosta ja Markku Heinisuota hyvästä ohjauksesta ja hyvistä neuvoista. Kiitän myös Matti Luotoa terästeknologiaan liittyvistä neuvoista ja Henri Hautamaata teräksen väsymiseen liittyvästä neuvonnasta. Lopuksi haluan kiittää puolisoani Heta Niskasta kaikesta tuesta koko prosessin aikana.

Tampereella, 24.5.2016



Ville Jokela

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Tausta.....	1
1.2	Tavoitteet .....	1
1.3	Rajaukset.....	2
1.4	Tutkimusmenetelmät .....	2
2.	TERÄSLIIITOSTEN MITOITUSMENETELMÄT .....	3
2.1	Suunnittelun perusteet.....	3
2.1.1	Liitoksien osavarmuusluvut.....	3
2.1.2	Väsyttävän kuormituksen huomioiminen.....	3
2.1.3	Materiaaliominaisuudet .....	4
2.1.4	Poikkileikkausluokka .....	5
2.2	Poikkileikkauksen kestävyys.....	7
2.2.1	Poikkileikkauksen kestävyys periaatteet.....	7
2.2.2	Vetokestävyys.....	10
2.2.3	Puristuskestävyys .....	10
2.2.4	Taivutuskestävyys.....	11
2.2.5	Leikkauskestävyys .....	12
2.2.6	Taivutus ja leikkaus .....	14
2.2.7	Taivutus ja aksiaalinen voima .....	14
2.2.8	Taivutus, leikkaus ja aksiaalinen voima.....	17
2.2.9	Nurjahduskestävyys .....	17
2.2.10	Leikkausviiveilmiö (Shear-lag) .....	20
2.3	Ruuvikiinnitys .....	22
2.3.1	Ruuvikiinnityksestä yleisesti .....	22
2.3.2	Ruuvikiinnitysluokat .....	23
2.3.3	Ruuvien sijainti.....	24
2.3.4	Leikkauskestävyys .....	25
2.3.5	Reunapuristuskestävyys .....	25
2.3.6	Liukumiskestävyys .....	26
2.3.7	Poikkileikkauksen vetokestävyys .....	27
2.3.8	Ruuvien vetokestävyys .....	27
2.3.9	Ruuvien ja mutterin lävistymiskestävyys .....	27
2.3.10	Yhdistetty leikkaus- ja vetovoima .....	28
2.3.11	Yhdistetty veto ja leikkaus kiinnitysluokassa C .....	28
2.3.12	Palamurtuminen .....	29
2.4	Hitsiliitokset .....	30
2.4.1	Hitsiliitokset yleisesti.....	30
2.4.2	Hitsiliitosten väsymissuunnittelu .....	30
2.4.3	Hitsin mitoitus .....	33
2.5	Liitoksen geometrinen parametrisointi .....	35

3.	LIITOKSEN KUSTANNUSLASKENTA.....	37
3.1	Kustannuslaskennan teoria.....	37
3.2	Materiaali .....	38
3.3	Työvaihe.....	38
3.3.1	Suihkupuhdistus.....	39
3.3.2	Levyn leikkaus.....	40
3.3.3	Profiilin hitsaus.....	44
3.3.4	Sahaus .....	47
3.3.5	Poraus.....	50
3.3.6	Loveus .....	54
3.3.7	Osien valmistus.....	57
3.3.8	Kokoonpano.....	57
3.3.9	Jälkikäsittely ja tarkastukset.....	60
3.3.10	Pinnoitus.....	61
3.4	Kuljetus.....	64
3.5	Asennus.....	64
4.	MITOITUSKOHTTEEN ESITTELY .....	70
4.1	Tutkimuskohde yleisesti .....	70
4.2	Kohteen tekniset tiedot .....	71
4.3	Liitosvaihtoehto 1: Leikkauspalaliitos.....	71
4.4	Liitosvaihtoehto 2: Universaaliliitos.....	73
5.	LASKENNALLINEN TARKASTELU .....	75
5.1	Liitosvaihtoehto 1: Leikkauspalaliitos.....	76
5.1.1	Leikkauspalaliitoksen lujuuslaskenta.....	77
5.1.2	Leikkauspalaliitoksen kustannuslaskenta.....	80
5.1.3	Leikkauspalaliitoksen väsymiskestävyyden arviointi.....	81
5.2	Liitosvaihtoehto 2: Universaaliliitos.....	84
5.2.1	Universaaliliitoksen lujuuslaskenta .....	85
5.2.2	Universaaliliitoksen kustannuslaskenta .....	90
5.2.3	Universaaliliitoksen väsymiskestävyyden arviointi.....	91
6.	TULOSTEN VERTAILU .....	94
6.1	Liitosten staattisen toiminnan arviointi.....	94
6.2	Lujuudelliset eroavaisuudet .....	94
6.3	Kustannukselliset eroavaisuudet .....	95
6.4	Väsymisluokkien eroavaisuudet.....	95
7.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	96
7.1	Yhteenveto .....	96
7.2	Johtopäätökset .....	96
7.3	Jatkotutkimusehdotukset.....	97
	LÄHTEET.....	98

LIITE A: LIITOSVAIHTOEHTO 1 LUJUUSLASKELMAT

LIITE B: LIITOSVAIHTOEHTO 1 KUSTANNUSLASKELMAT

LIITE C: LIITOSVAIHTOEHTO 2 LUJUUSLASKELMAT

LIITE D: LIITOSVAIHTOEHTO 2 KUSTANNUSLASKELMAT

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

BIM	(Building Information Model) Rakennuksen tietomalli
EN 1993-1-1	Teräsrakenteiden suunnittelustandardi (EC3)
EN 1993-1-8	Teräsrakenteiden liitosten suunnittelustandardi (EC3)
EN 1993-1-9	Teräsrakenteiden väsymisen suunnittelustandardi (EC3)
NDT	(Non-Destructive Testing) ainetta rikkomaton koeistus

### Lujuuslaskennassa käytetyt suureet

+r	Hitsin railoitus lisätty
A	Pinta-ala
a	Hitsin a-mitta
A <sub>i</sub>	Yksittäisen osan pinta-ala
A <sub>nt</sub>	Vedon rasittama nettopinta-ala
A <sub>nV</sub>	Leikkauksen rasittama nettopoikkipinta-ala
A <sub>s</sub>	Pultin poikkipinta-ala
b	Profiilin leveys
c	Profiilinen välinen rako
d	Laippojen pyöristysten välinen etäisyys
d <sub>0</sub>	Reiän halkaisija
e <sub>1</sub>	Reiän reunaetäisyys voiman suuntaan
e <sub>2</sub>	Reiän reunaetäisyys voimaa kohtisuoraan vastaan
F <sub>b,Rd</sub>	Reunapuristuskestävyys
F <sub>p,C</sub>	Esijännitysvoima
F <sub>s,Rd</sub>	Liukumiskestävyys
f <sub>u</sub>	Teräksen vetokestävyys
f <sub>ub</sub>	Pultin vetomurtolujuus
F <sub>w,Rd</sub>	Hitsin vetokestävyys
f <sub>y</sub>	Teräksen myötöraja
h	Profiilin korkeus
h <sub>i</sub>	Laippojen sisäpintojen välinen etäisyys
I <sub>y</sub>	Neliömomentti y-akselin suhteen
I <sub>z</sub>	Neliömomentti z-akselin suhteen
k <sub>1</sub>	Korjauskerroin
k <sub>2</sub>	Korjauskerroin
k <sub>s</sub>	Vaikutuskerroin
L <sub>w</sub>	Hitsin pituus
mp	Molemmin puolin
M <sub>y,Ed</sub>	Momentin mitoitusarvo y-akselin ympäri
M <sub>z,Ed</sub>	Momentin mitoitusarvo z-akselin ympäri
n	Leikkeisyys



$N_{Ed}$	Normaalivoiman mitoitusarvo
$n_i$	Laippojen lukumäärä
$p_1$	Reikien väli voiman suunnassa
$p_2$	Reikien väli voimaa kohtisuoraan vastaan
$p_{2min}$	Reikien välin minimi arvo voimaa kohtisuoraan vastaan
$r$	säde
$t$	Levyn paksuus
$t_f$	Laipan paksuus
$t_w$	Uuman paksuus
$V_{eff,1,Rd}$	Palamurtumisen kapasiteetti
$W_y$	Taivutusvastus y-akselin suhteen
$V_{y,Ed}$	Leikkausvoiman mitoitusarvo y-suuntaan
$W_z$	Taivutusvastus z-akselin suhteen
$V_{z,Ed}$	Leikkausvoiman mitoitusarvo z-suuntaan
$y$	y-akseli
$y_0$	Kappaleen taivutusakselin etäisyys laskenta tasosta
$y_i$	Yksittäisen osan painopisteen etäisyys y-akselista
$y_{max}$	Kappaleen enimmäisreunaetäisyys taivutusakselista
$z$	z-akseli
$z_0$	Kappaleen taivutusakselin etäisyys laskenta tasosta
$z_i$	Yksittäisen osan painopisteen etäisyys z-akselista
$z_{max}$	Kappaleen enimmäisreunaetäisyys taivutusakselista
$\alpha_b$	Korjauskerroin
$\beta_w$	Korrelaatiokerroin
$\gamma_c$	Betonin kestävyys
$\gamma_{M0}$	Rakenneosien ja poikkileikkausten osavarmuusluku
$\gamma_{M1}$	Rakenneosien ja poikkileikkausten osavarmuusluku
$\gamma_{M2}$	Rakenneosien ja poikkileikkausten osavarmuusluku
$\gamma_{M3}$	Liukumiskestävyyden osavarmuusluku (kiinnitysluokka C)
$\gamma_{M3,ser}$	Liukumiskestävyyden osavarmuusluku (kiinnitysluokka B)
$\gamma_{M4}$	Injektioruuvien reunapuristuskestävyys
$\gamma_{M5}$	Rakenneputkien liitosten kestävyys ristikoissa
$\gamma_{M6,ser}$	Niveltappien kestävyys käyttörajatilassa
$\gamma_{M7}$	Ruuvien esijännitys
$\mu$	Kitkakerroin
$\pi$	Pii
$\Sigma$	summa

## KUSTANNUSLASKENNASSA KÄYTETYT TERMIT AIHEALUEITTAIN

$C_T$	Kokonaiskustannukset
$C_{SM}$	Materiaalin kustannukset
$C_B$	Suihkupuhalluksen kustannukset
$C_{Cu}$	Levyn leikkaamisen kustannukset
$C_{BW}$	Profiilin hitsauksen kustannukset
$C_{SM}$	Profiilin sahauksen kustannukset
$C_D$	Porauksen kustannukset
$C_{Co}$	Loveuksen kustannukset
$C_{PF}$	Osien valmistuskustannukset
$C_{PA}$	Osien kiinnityskustannukset
$C_{PT}$	Jälkikäsittelyn kustannukset
$C_P$	Maalaus kustannukset
$C_T$	Kuljetuskustannukset
$C_E$	Asennuskustannukset

### MATERIAALI

$W_{SMPI}$	Levyn paino
$T_{NK}$	Tuottamaton aika työvaiheessa (k)
$T_{Pk}$	Tuottava aika työvaiheessa (k)
$C_{Lk}$	Yksikön työkustannus työvaiheessa (k)
$C_{Eqk}$	Käytetyn laitteiston hankintahinta työvaiheessa (k)
$C_{Mk}$	Käytetyn laitteiston ylläpitokustannukset työvaiheessa (k)
$C_{REk}$	Työtilan hankintahinta työvaiheessa (k)
$C_{Sek}$	Työtilan ylläpitokustannukset työvaiheessa (k)
$C_{Ck}$	Työssä kuluneiden materiaalien kustannukset työvaiheessa (k)
$C_{Enk}$	Työn kuluttaman energian kustannukset työvaiheessa (k)
$C_{Ck}$	Ajasta riippumattomien materiaalien kulu työvaiheessa (k)
$u_k$	Työvaiheen (k) hyötyaste

### SUIHKUPUHDISTUS

$L_B$	Osan pituus
$v_c$	Kuljettimen nopeus

### LEVYN LEIKKAUS

$L_{Cu}$	Leikattava pituus
$t$	Osan paksuus
$v_{Cu}$	Leikkausnopeus

### PROFIILIN HITSAUS

$W_w$	Hitsin massa
$L_w$	Hitsin pituus
$a$	Pienahitsin a-mitta
$b$	V hitsin syvyys mitta

$\alpha$	Viistettyjen reunojen välinen kulma
$n_{wh}$	Yhdenaikaisten hitsauksien lukumäärä
SAHAUS	
$h$	Profiilin korkeus
$S$	Sahan leikkausnopeus pystysuunnassa
$S_m$	Materiaalin vaikutuskerroin
$A_h$	Profiilin vaakaosien yhteenlaskettu poikkipinta-ala
$Q$	Terän sahaus tehokkuus
$t_{mv}$	Paksuimman pystyssä olevan levyn seinämäpaksuus
$S_t$	Terän sahauksen kapasiteetti
$F_s$	Käytetyn sahauslaitteiston ominainen arvo
$F_{sp}$	Kerroin joka riippuu sahattavasta materiaalista
$A_t$	Sahattu poikkipinta-ala
$p_{SB}$	Uuden terän hinta
PORAUS	
$n_{ri}$	Reikien lukumäärä rivissä $r$ suuntaan $i$
$r_f$	Rivien lukumäärä ensimmäisellä ajolla
$r_s$	Rivien lukumäärä toisella ajolla
$f_n$	Poran syöttönopeus
$r$	Poran pyörimisnopeus
$V_c$	Leikkausnopeus
$n_{ij}$	Reikien lukumäärä $i$ rivissä $j$ suuntaan
$t_j$	Levyn paksuus $j$ suuntaan
$d_{ij}$	Reiän halkaisija $i$ rivissä $j$ suuntaan
$d$	Poran terän halkaisija
PDB	Poran terän hinta
ndd	Erikokoisten poranterien lukumäärä
$T_{PDK}$	Eri poranterien kulutusaika yhteenlaskettuna
LOVEUS	
$n_{Co}$	Yksittäisen loveuksien ja viisteiden lukumäärä
$L$	Profiilin pituus
$L_{Coi}$	Loveuksen/viisteen $i$ pituus
$V_{Coi}$	Levyn paksuudesta riippuva leikkausnopeus
$t_i$	Viistettävän osan/levyn $i$ paksuus
KOKOONPANO	
$L_{fw}$	Pienahitsin pituus
$L_{bw}$	V hitsin pituus
$W_{cf}$	Hitsauslangan kulutus pienahitsillä
$W_{cb}$	Hitsauslangan kulutus V-hitsillä
JÄLKIKÄSITTELY JA TARKASTUKSET	
$L_{PT}$	Profiilin purseista poistettavien reunojen pituus
$L_{UT}$	Ultraäänitarkastusten pituus
$L_{MT}$	Magneettipartikkelitarkastusten pituus
PINNOITUS	
$t_{loss}$	Maalin kulutus

DFT	Kuivan kalvon paksuus
WFT	Kostean kalvon paksuus
$n_f$	Maalikerrosten määrä
$v_{si}$	Kuivuneen maalin tilavuus maalikerroksessa
DFT <sub>i</sub>	Kuivuneen maalin paksuus maalikerroksessa
$t_{iloss}$	Paksuuden menetys maalikerroksessa i
$f_{pg}$	Maaliruiskun läpi kulkenut virtaus
A	Kokoonpanon maalattava pinta-ala
$u_{cp}$	Maalin yksikköhinta
$T_{Dyi}$	Maalikerroksen i kuivumisaika
$A_{Dy}$	Kokoonpanon kuivumiseen tarvittava tila
$L_A$	Kokoonpanon pituus
$W_{Amin}$	Kokoonpanon lyhimmän sivun mitta
ASENNUS	
$T_E$	Asennukseen kuluva aika
$T_{EI}$	Nostoon kuluva aika
$T_{Ej}$	Pulttaamiseen kulunut aika
$T_{Em}$	Henkilönostimen liikuttamiseen kulunut aika
$T_{Er}$	Nosturin koukun palautukseen kulunut aika
$C_{Ep}$	Asennuksessa käytettyjen pulttien yhteishinta
$n_{bi}$	Kiinnitettävien pulttien lukumäärä
$C_{bBj}$	Koon j pultin yksikköhinta
$C_{bNj}$	Koon j mutterin yksikköhinta
$C_{bWj}$	Koon j aluslevyn yksikköhinta

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Tausta

Tärkeimmät runkomateriaalit rakentamisessa, puu, betoni ja teräs, ovat kilpailleet käytettävyydellään. Tämä on edesauttanut kunkin materiaalin teknologista kehitystä valmistuksesta viimeistelyyn. Materiaaliteknologian ollessaan ajan huipulla, on olennaista saada materiaalista kaikki irti kustannustehokkaasti. Teräsrakenteiden suunnittelussa tietokonepohjaiset mitoitusohjelmat rakenteiden lujuuden puolesta ovat arkipäivää. Näin kohteeseen soveltuvat profiilit saadaan valittua tehokkaasti pienimmän massan periaatteella. Tällöin kevyimmän kestävä profiilin massa on usein sen valintaperuste alhaiselle kustannukselle. Teräsrakenteiden paino on suuntaa-antava työkalu kustannusarvioon, mutta moni asia voi vaikuttaa merkittävästi kohteen teräsrungon todelliseen hintaan. Liitoksien valinnalla on olennainen vaikutus teräsprofiileihin. Yleisesti liitokset idealisoidaan rungon mitoitusvaiheessa nivelellisiksi tai jäykiksi. Liitoksen valinta on vaikuttanut mitoituksellisesti kelpaavaan profiiliin ja näin sen vaikutus on huomioitu teräsprofiilin massan kautta kustannuslaskennassa. Liitoksien suora kustannusvaikutus, teräsprofiilin lisäksi, on alustavissa kustannusarvioinneissa huomioitu lisäämällä arvioidun rungon profiilien massan lisäksi prosentuaalisena osa profiilien massasta. Esimerkiksi rungon profiilit painavat 100 tonnia ja siihen on arvioitu 10 % liitoksien levyosia, jolloin koko runko painaisi 110 tonnia. Tämän painon mukaan saataisiin ennakoiva arvio teräsrungon hinnasta. Alustavan arvioinnin jälkeen kustannuslaskentaa tarkennetaan toteutuvien osien painolla. Toteutuva paino on saatu rungon suunniteluun käytetystä BIM-mallista. Tämä antaa massoiltaan tarkan tiedon, mutta se ei vielä kerro todellisia kustannuksia. Nivelellisen tai jäykän liitoksen voi tehdä monella eri tavalla ja jokaisella on omat kustannuksensa. Mikäli kyseinen liitos toistuu useasti kohteessa, kustannuksiltaan halvan liitoksen valinta voi muodostaa urakkakilpailussa ratkaisevan eron.

## 1.2 Tavoitteet

Helsingin Olympiastadionin perusparannuksen yhteydessä tehtävä henkilökatoksen kantavarunko on valittu tehtäväksi teräksestä. Yli 10 000 profiilin liitoksista on alustavat esimerkkityypit ja joistakin liitoksista on vaihtoehtoisia ratkaisuja. Katoksen erittäin suuren liitoslukumäärän takia on olennaista arvioida myös tarjolla olevien liitosvaihtoehtojen kustannusvaikutuksia.

Tämän diplomityön tavoitteena on arvioida linjaristikon ja niskaristikon liitosvaihtoehtojen kustannuksia. Jotta liitokset olisivat vertailukelpoisia kustannuksiltaan, ne on mitoi-

tettava suunnilleen samoille käyttöasteille. Liitosten mitoitus tehdään eurokoodilla. Kustannuslaskennan teoriaksi on valittu Jaakko Haapion väitöskirjaan pohjautuva menetelmä [4]. Jotta mitoitus ja kustannuslaskenta olisi mahdollista iteroida kahden liitosvaihtoehdon väliltä, tarvitaan helppokäyttöinen laskentaohjelma. Laskentaa varten valittiin excel2013 taulukkolaskentaohjelma. Liitosvaihtoehtojen lujuusmitoituksen ja kustannuslaskennan tulosten yhteenveto on esitetty kappaleissa 5.1 ja 5.2. Liitosten laskennan tarkempi tulostus on esitetty tämän työn liitteissä.

Katoksen lentokoneen siipeä muistuttava muodon on todettu aiheuttavan teräsrakenteille väsyttävää kuormitusta [12]. Väsyttävän kuormituksen vaikutusta on pyrittävä vähentämään rakenteellisilla ratkaisuilla liitoksissa [3, 8, 9]. Tutkittavien liitosvaihtoehtojen väsymisluokkaa on arvioitu kappaleissa 5.1.3 ja 5.2.3.

### 1.3 Rajaukset

Vaikka kohteen rakenteet ovat alttiita väsyttävälle kuormitukselle ja niiden vaikutusta pyritään pienentämään sopivilla rakenneratkaisuilla, varsinainen väsymistutkimus suoritetaan työn ulkopuolisesti kohteen väsymisasiantuntijan kanssa. Liitokset yleensä idealisoidaan joko nivelellisiksi tai jäykiksi, todellisuudessa liitokset ovat usein jotain siltä väliltä. Tässä työssä tutkittavien liitosten jäykkyyttä ja kiertymäkykyä ei tutkita laskennallisesti. Liitosten staattista toimintaa arvioidaan ideatasolla kappaleessa 6.1. Tutkittavilla liitosvaihtoehtoilla ei ole varaston, kuljetuksen ja noston etäisyyden kannalta merkittäviä eroja. Nämä osa-alueet ovat jätetty kustannusarvioinnin ulkopuolelle. Tutkittavissa kohdissa on olemattomat vääntörasitukset sekä kyseisillä liitosvaihtoehtoilla ei ole merkittäviä vaikutuksia profiilien kiepahdukseen, joten liitosten vääntökestävyys ja kiepahdus vaikutukset ovat jätetty tutkimuksen ulkopuolelle. Profiilien ja liitosten palomitoitusta ei suoriteta tässä työssä.

### 1.4 Tutkimusmenetelmät

Liitosten rakenteellinen kapasiteetti on laskettu käyttäen vallitsevaa eurokoodia [1, 6, 7]. Liitosten valmistettavuus konepajalla on arvioitu työn ohjaajan sekä kokeneiden suunnittelijoiden haastattelujen perusteella. Kustannuslaskennan menetelmäksi on valittu Jaakko Haapion väitöskirjassa esitelty työvaiheisiin ja niihin kuluneeseen aikaan perustuva laskentamenetelmä [4].

## 2. TERÄSLIITOSTEN MITOITUSMENETELMÄT

Teräслиitosten rakenteellinen mitoitus on esitetty Eurokoodi 3:n mukaan [1, 6, 7]. Laskenta on yksinkertaistettu yksittäisiin osiin ja niiden liittymisiin. Tässä kappaleessa ei ole esitetty eurokoodi 3:n komponenttimenetelmää [1, kappale 6]. Tämän kappaleen mitoitusmenetelmissä oletetaan materiaaleiksi standardin EN 10025-2 taulukko 2:n teräslajeista S235 ja S355 [5]. Liitosten väsymislukua ei todenneta laskennallisesti, ne arvioidaan vastaavien ratkaisujen perusteella kohteen väsymissuunnittelijan kanssa [8, 17]. Liitosten väsymiskestävyyttä parannetaan rakenneratkaisuilla, joiden vaikutukset on arvioitu kappaleissa 5.1.3 ja 5.2.3.

### 2.1 Suunnittelun perusteet

#### 2.1.1 Liitoksien osavarmuusluvut

Rakenteellinen kestävyys varmennetaan jakamalla saatu kapasiteetti osavarmuusluvulla. Liitosten ja rakenneosien kestävyys osavarmuusluvut on esitetty taulukossa 2.1.

**Taulukko 2.1** Liitosten osavarmuusluvut [1, taulukko 2.1]

Rakenneosien ja poikkileikkausten kestävyys	$\gamma_{M0}$ , $\gamma_{M1}$ and $\gamma_{M2}$ ks. EN 1993-1-1
Ruuvien kestävyys	$\gamma_{M2}$
Niittien kestävyys	
Niveltappien kestävyys	
Hitsien kestävyys	
Reunapuristuskestävyys	
Liukumiskestävyys - murtorajatilassa (kiinnitysluokka C) - käyttörajatilassa (kiinnitysluokka B)	$\gamma_{M3}$ $\gamma_{M3,ser}$
Injektionruuvien reunapuristuskestävyys	$\gamma_{M4}$
Rakenneputkien liitosten kestävyys ristikoissa	$\gamma_{M5}$
Niveltappien kestävyys käyttörajatilassa	$\gamma_{M6,ser}$
Ruuvien esijännitys	$\gamma_{M7}$
Betonin kestävyys	$\gamma_c$ ks. EN 1992

#### 2.1.2 Väsyttävän kuormituksen huomioiminen

Teräsrakenteiden väsymiskestävyyden arviointi eurokoodissa tehdään käyttämällä joko vaurionsietoperiaatetta tai varman kestämissen periaatetta [8 kappale 3].

Vaurionsietoperiaatteessa hyväksytään rakenteelle luotettavuustaso, jonka käyttöä on mukaisena ehtona on etukäteen suunnitellut tarkastus- ja huolto-ohjeita väsymisvaurioiden

löytämiseksi ja korjaamiseksi. Tätä menetelmää saa käyttää vain, jos väsymisvaurion sat-  
tuessa kuormien uudelleen jakaantuminen voi tapahtua eri rakenneosien välillä [8 kappale  
3 (2)].

Varman kestäminen periaate mahdollistaa riittävän varmuuden rakenteille ilman tarvetta  
jatkuviin tarkistuksiin. Mikäli rakenne on altis äkilliselle romahtamiselle väsymisvaurion  
tilanteessa, vain varman kestäminen periaatetta saa käyttää [8 kappale 3 (3)].

Tässä työssä tutkittavien liitosten laskennallinen väsymistarkastelu tehdään työn ulko-  
puolisesti varman kestäminen periaatteella. Tämän työn laajuudessa pyritään kehittämään  
tutkittaviin liitoksiin väsymisen kannalta kestäviä rakenneratkaisuja. Liitosten väsymis-  
kestävyyden arviointi on suoritettu kappaleissa 5.1.3 ja 5.2.3.

### 2.1.3 Materiaaliominaisuudet

Tässä työssä esitetyt mitoitusmenetelmät soveltuvat standardissa SFS EN 10025 esitet-  
tyihin teräslaatuihin S235...S355. Katoksen rakenneteräkseksi on valittu S355 [11, 5, 7].  
Taulukossa 2.2 on esitetty teräksen myötölujuuden ja vetomurtolujuuden arvot eri levyn-  
paksuuksilla.

Kimmokerroin  $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$

Liukukerroin  $G = 81\,000\text{ N/mm}^2$

Poissonin luku  $\nu = 0,3$

**Taulukko 2.2** Rakenneterästen lujuuksien nimellisarvot [1, taulukko 3.1]

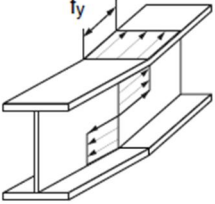
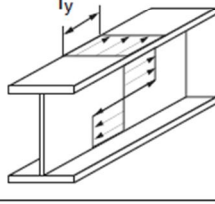
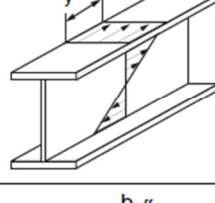
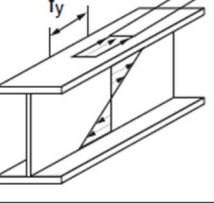
Standardi ja teräslaji	Nimellispaksuus t [mm]			
	t ≤ 40 mm		40 mm < t ≤ 80 mm	
	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>EN 10025-2</b>				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550
<b>EN 10025-3</b>				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
<b>EN 10025-4</b>				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
<b>EN 10025-5</b>				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490
<b>EN 10025-6</b>				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550



## 2.1.4 Poikkileikkausluokka

Profiilit jaetaan poikkileikkauksensa perusteella neljään luokkaan, jotka kuvastava missä laajuudessa poikkileikkauksen paikallinen lommahdus rajoittaa poikkileikkauksen kestävyttä ja kiertymiskykyä. [7 kappale 5.5]. Eri poikkileikkausluokkien mitoitusmenetelmät ovat esitetty taulukossa 2.3. Profiilin poikkileikkausluokan määrittäminen on esitetty taulukoissa 2.4 ja 2.5 [7].

**Taulukko 2.3** Mitoitusmenetelmät eri poikkileikkausluokissa [14, taulukko 2.6]

Poikkileikkausluokka	Kestävyyden laskentatapa	Voimasuureiden laskentatapa	Jännitysjakauma, kun kestävyys on saavutettu
1	plastisuusteoria	plastisuusteoria	
2	plastisuusteoria	kimmoteoria	
3	kimmoteoria	kimmoteoria	
4	tehollinen poikkileikkaus	kimmoteoria	

**Taulukko 2.4** Kahdelta reunalta tuettujen puristettujen taso-osien suurimmat leveys-paksuus suhteet [7, taulukko 5.2 osa 1].

Kahdelta reunalta tuetut puristetut taso-osat						
				Taivutus ko. akselin suhteen		
				Taivutus ko. akselin suhteen		
Poikkileikkausluokka	Taivutetut taso-osat	Puristetut taso-osat	Taivutetut ja puristetut taso-osat			
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)						
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	$kun \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ $kun \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	$kun \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ $kun \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$			
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)						
3	$c/t \leq 124\varepsilon$ <sup>1)</sup>	$c/t \leq 42\varepsilon$ <sup>2)</sup>	$kun \psi > -1: c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ <sup>3)</sup> $kun \psi \leq -1^+): c/t \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$			
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$						
	$f_y$	235	275	355	420	460
	$\varepsilon$	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

\*) Arvoa  $\psi \leq -1$  käytetään, kun joko puristusjännitys  $\sigma < f_y$  tai vedetyn puolen venymä  $\varepsilon_y > f_y/E$

**Taulukko 2.5** Yhdeltä reunalta tuettujen puristettujen taso-osien suurimmat leveys-paksuus suhteet [7, taulukko 5.2 osa 2].

Ulokkeelliset laipat						
Valssatut profiilit			Hitsatut profiilit			
Poikkileikkausluokka	Puristetut taso-osat	Puristetut ja taivutetut taso-osat				
		Vapaa reuna on puristettu		Vapaa reuna on vedetty		
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)						
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)						
3	$c/t \leq 14\epsilon$ <sup>4)</sup>	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ <sup>5)</sup>				
$k_\sigma$ ks. EN 1993- 1-5						
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	235	275	355	420	460
	$\epsilon$	1.00	0.92	0.81	0.75	0.71

## 2.2 Poikkileikkauksen kestävyys

### 2.2.1 Poikkileikkauksen kestävyysperiaatteet

Poikkileikkauksen kestävyksiä verrataan vastaaviin voimasuureisiin. Usean voimasuuren vaikuttaessa samaan aikaan, poikkileikkauksen kestävyys verrataan voimasuureiden yhteisvaikutukseen. Missään tilanteessa voimasuureet eivät saa ylittää vastaavia kestävyksiä. Kestävyyden mitoitusarvot riippuvat poikkileikkausluokasta. Kimmoteorian mukaisessa mitoituksessa voidaan tutkia summajännityksiä poikkileikkauksen kriittisissä pisteissä. Eurokoodi antaa yleiskaavan (2.1) [7, kaava 6.1], jolla summajännitykset voidaan verrata poikkileikkauksen kestävyksiin.

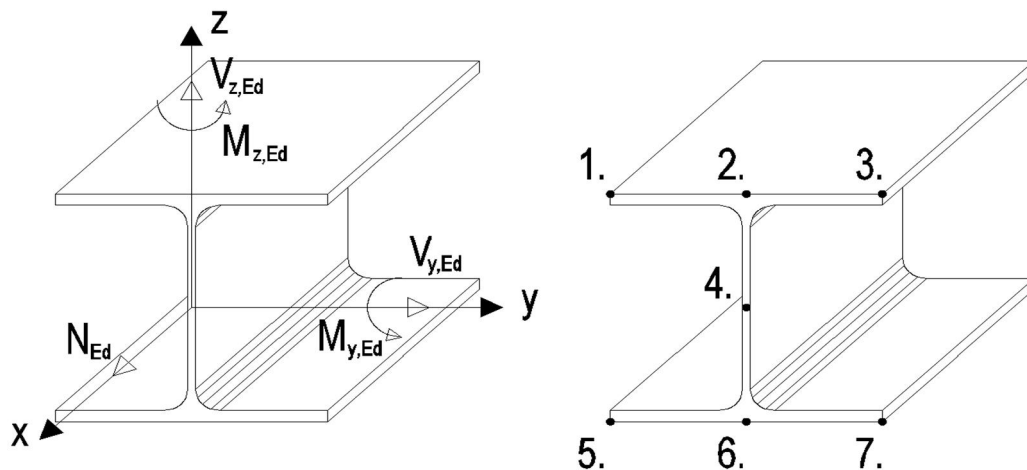
$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\bar{f}_y/\gamma_{M0}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\bar{f}_y/\gamma_{M0}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\bar{f}_y/\gamma_{M0}}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\bar{f}_y/\gamma_{M0}}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{\bar{f}_y/\gamma_{M0}}\right)^2 \leq 1 \quad (2.1)$$

Voimasuureiden lineaarisen summauksen voi tehdä poikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3 varalle puolelle olevalla likimääräiskaavalla (2.2) [7, kaava 6.2]

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1 \quad (2.2)$$

$N_{Ed}$ ,  $M_{y,Ed}$  ja  $M_{z,Ed}$  ovat poikkileikkausta rasittavien voimasuureiden mitoitusarvoja.  $N_{Rd}$ ,  $M_{y,Rd}$  ja  $M_{z,Rd}$  ovat poikkileikkausluokasta riippuvia kestävyysmitoitussarvoja. Näissä on huomioitu poikkileikkausluokkien vaatimat vähennykset.

Kaava ei ole käytännöllinen tutkittaessa universaaliliitoksen paarteiden I-poikkileikkausta. Tässä työssä on johdettu eri voimasuureiden aiheuttamien jännitysten yhteisvaikutus I-poikkileikkaukselle sen tutkittaviin pisteisiin. Poikkileikkausta rasittavat voimasuureet ja kriittisiltä summajännityksiltään tarkisteltavat pisteet ovat esitettyinä kuvassa 2.1.



**Kuva 2.1** Profiilin voimasuureiden koordinaatisto ja jännitysten tarkastelupisteet.

Universaaliliitoksen paarteen yksittäisten jännitysten määrittämisessä on käytetty kaavoja 2.3 normaalivoiman aiheuttamalle jännitykselle, 2.4 uuman suuntaisen leikkausvoiman aiheuttamalle jännitykselle, 2.5 laipan suuntaisen leikkausvoiman aiheuttamalle jännitykselle, 2.6 taivutuksellisesti vahvan suunnan momentin aiheuttamalle jännitykselle ja 2.7 taivutuksellisesti heikon suunnan momentin aiheuttamalle jännitykselle.

Jännitys normaalivoimasta:

$$\sigma_N = \frac{N_{Ed}}{A} \quad (2.3)$$

missä

$N_{Ed}$	Normaalivoiman mitoitusarvo
$A$	Profiilin poikkipinta-ala

Jännitys uuman suuntaisesta leikkausvoimasta:

$$\tau_z = \frac{V_{z,max}}{A_{Vz}} = \frac{\sqrt{3} * V_z}{h_i * t_w} \quad (2.4)$$

missä

$V_{z,max}$	Leikkausvoiman maksimi mitoitusarvo z-akselin suuntaan
$A_{Vz}$	Profiilin poikkipinta-ala leikkaukselle z-akselin suuntaan
$V_z$	Leikkausvoiman mitoitusarvo z-akselin suuntaan
$h_i$	I-profiilin laippojen sisäpintojen välinen etäisyys
$t_w$	I-profiilin uuman paksuus

Jännitys laippojen suuntaisesta leikkausvoimasta:

$$\tau_y = \frac{V_{y,max}}{A_{Vy}} = \frac{\sqrt{3} * V_y}{2 * b * t_f} \quad (2.5)$$

missä

$V_{y,max}$	Leikkausvoiman maksimi mitoitusarvo y-akselin suuntaan
$A_{Vy}$	Profiilin poikkipinta-ala leikkaukselle y-akselin suuntaan
$V_y$	Leikkausvoiman mitoitusarvo y-akselin suuntaan
$b$	I-profiilin laipan leveys
$t_f$	I-profiilin laipan paksuus

Jännitys vahvan suunnan taivutusmomentista:

$$\sigma_{My} = \frac{M_y}{W_y} \quad (2.6)$$

missä

$M_y$	Momentin mitoitusarvo y-akselin ympäri
-------	--

$W_y$  Profiilin taivutusvastus y-akselin ympäri

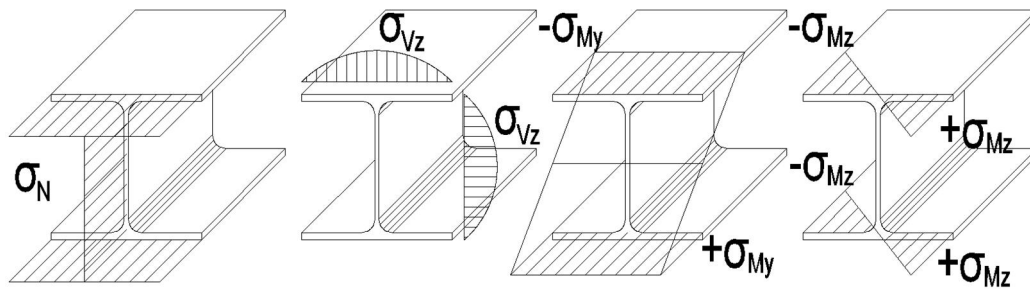
Jännitys heikon suunnan taivutusmomentista:

$$\sigma_{Mz} = \frac{M_z}{W_z} \quad (2.7)$$

missä

$M_z$  Momentin mitoitusarvo z-akselin ympäri  
 $W_z$  Profiilin taivutusvastus z-akselin ympäri

Yksittäisten voimasuureiden aiheuttamia jännityksiä on esitetty kuvassa 2.2.



**Kuva 2.2** Voimasuureiden aiheuttamat jännityskuvaajat.

Profiilin tarkastelupisteiden (vrt. kuva 2.1) summausjännitysten kaavat ovat alla (2.8...2.14). Samoja kaavoja sovelletaan myös liitoslevyjen tarkastelupisteiden (vrt. kuva 2.3) jännitysten arvioimiseen.

$$1. \quad \sigma_1 = \sigma_N - \sigma_{My} - \sigma_{Mz} \quad (2.8)$$

$$2. \quad \sigma_2 = \sigma_N + \tau_y - \sigma_{My} \quad (2.9)$$

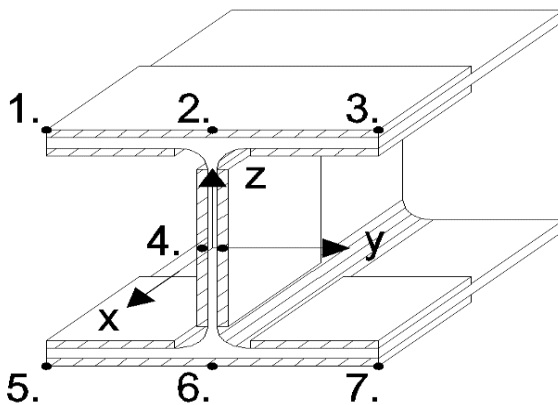
$$3. \quad \sigma_3 = \sigma_N - \sigma_{My} + \sigma_{Mz} \quad (2.10)$$

$$4. \quad \sigma_4 = \sigma_N + \tau_z \quad (2.11)$$

$$5. \quad \sigma_5 = \sigma_N + \sigma_{My} - \sigma_{Mz} \quad (2.12)$$

$$6. \quad \sigma_6 = \sigma_N + \tau_y + \sigma_{My} \quad (2.13)$$

$$7. \quad \sigma_7 = \sigma_N + \sigma_{My} + \sigma_{Mz} \quad (2.14)$$



**Kuva 2.3** Levyjen jännitysten tarkistuspisteet.

### 2.2.2 Vetokestävyys

Vetokestävyyden tulee täyttää kaikissa poikkileikkausluokissa kaavassa (2.15) esitetty ehto [7, kaava 6.5].

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.15)$$

missä

$N_{Ed}$	Vetovoiman mitoitusarvo
$N_{t,Rd}$	Vetokestävyys

Vetovoima kestävyys määritellään reiällisessä poikkileikkauksessa valitsemalla pienempi arvo kaavoista 2.16 ja 2.17 [7, kaava 6.5 ja 6.6].

Bruttopoikkileikkauksen plastinen vetokestävyyden mitoitusarvo:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.16)$$

missä

$A$	Vedolle altistunut poikkileikkauksen pinta-ala
$f_y$	Teräksen myötöraja
$\gamma_{M0}$	Materiaalin osavarmuusluku

Nettopoikkileikkauksen vetokestävyyden arvo reikien kohdalla:

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (2.17)$$

missä

$A_{net}$	Poikkileikkauksen pinta-ala vedolla reikien kohdalla
$f_u$	Teräksen vetokestävyys
$\gamma_{M02}$	Liitoksen osavarmuusluku

### 2.2.3 Puristuskestävyys

Puristusvoiman mitoitusarvon ( $N_{c,Rd}$ ) tulee kaikissa poikkileikkausluokissa täyttää kaavassa 2.18 esitetty ehto [7, kaava 6.9]:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.18)$$

missä

$N_{Ed}$	Puristusvoiman mitoitusarvo
$N_{c,Rd}$	Puristuskestävyys

Poikkileikkauksen puristuskestävyyden mitoitusarvo ( $N_{c,Rd}$ ) tasaiselle puristukselle laske-  
taan kaavalla 2.19 (poikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3) ja kaavalla 2.20 (poikkileikkausluo-  
kassa 4) [7, kaava 6.10 ja kaava 6.11].

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{Poikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3} \quad (2.19)$$

missä

A	Poikkileikkauksen puristettu pinta-ala
$f_y$	Teräksen myötöraja
$\gamma_{M0}$	Materiaalin osavarmuusluku

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{Poikkileikkausluokassa 4} \quad (2.20)$$

missä

$A_{eff}$	Vedolle altistunut poikkileikkauksen pinta-ala
$f_y$	Teräksen myötöraja
$\gamma_{M0}$	Materiaalin osavarmuusluku

## 2.2.4 Taivutuskestävyys

Taivutusmomentin mitoitusarvon ( $M_{c,Rd}$ ) tulee kaikissa poikkileikkauksissa täyttää kaa-  
van 2.21 ehto [7, kaava 6.12].

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.21)$$

missä

$M_{Ed}$	Taivutusmomentin mitoitusarvo
$M_{c,Rd}$	Taivutuskestävyys

Poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo ( $M_{c,Rd}$ ) poikkileikkauksen yhden  
pääjähyyks akselin suhteen tapahtuvassa taivutuksessa lasketaan poikkileikkausluokissa 1  
ja 2 kaavalla 2.22, poikkileikkausluokassa 3 kaavalla 2.23 ja poikkileikkausluokassa 4  
kaavalla 2.24 [7, kaava 6.13 ja kaava 6.14]. Kahden akselin suhteen tapahtuvassa taivu-  
tuksessa sovelletaan kohdan 2.2.7 (taivutus ja aksiaalinen voima) mukaista menetelmää.  
Pulttien reikiä ei tarvitse huomioida puristuspuolella, mikäli pultit ovat rei'issä ja reikä ei  
ole ylisuuri tai sokea [7, 6.2.5].

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{Poikkileikkausluokat 1 ja 2} \quad (2.22)$$

missä

$W_{pl}$	Poikkileikkauksen plastinen taivutusvastus
----------	--

$f_y$	Teräksen myötöraja
$\gamma_{M0}$	Materiaalin osavarmuusluku

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{Poikkileikkausluokka 3} \quad (2.23)$$

missä

$W_{el}$	Poikkileikkauksen kimmainen taivutusvastus
$f_y$	Teräksen myötöraja
$\gamma_{M0}$	Materiaalin osavarmuusluku

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{Poikkileikkausluokka 4} \quad (2.24)$$

missä

$W_{eff}$	Poikkileikkauksen tehollinen taivutusvastus
$f_y$	Teräksen myötöraja
$\gamma_{M0}$	Materiaalin osavarmuusluku

Vedetyssä laipassa olevat kiinnittimien reiät voidaan jättää huomioon ottamatta edellyttäen, että vedetylle laipalle on voimassa kaava 2.25 ehto [7, kaava 6.16]:

$$\frac{A_{f,net} 0,9 f_y}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_f f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.25)$$

missä

$A_{f,net}$	Laipan pulttien vähennykset huomioiva nettopinta-ala
$f_y$	Teräksen myötöraja
$\gamma_{M0}$	Materiaalin osavarmuusluku
$A_f$	Vedetyn laipan pinta-ala
$\gamma_{M2}$	Liitoksen osavarmuusluku

## 2.2.5 Leikkauskestävyys

Leikkausvoiman mitoitusarvon ( $V_{Ed}$ ) tulee kaikissa poikkileikkauksissa täyttää kaavan 2.26 ehto [7, kaava 6.17]:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.26)$$

missä

$V_{Ed}$	Leikkausvoiman mitoitusarvo
$V_{c,Rd}$	Leikkauskestävyys



Kun vääntöä ei ole, poikkileikkausluokassa 1  $V_{c,Rd}$  lasketaan plastisuusteorialla kaavan 2.27 mukaan. Poikkileikkausluokassa 2 ja 3 leikkauskestävyys lasketaan kimmoteorialla kaavan 2.28 mukaan [7, kaava 6.18]. Tämä kaava antaa tuloksen konservatiivisesti varmalle puolelle. Neliöjuuri kolme on mahdollista poistaa jakajasta.

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v(f_y/\sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (2.27)$$

missä

$A_v$	Leikkauspinta-ala [mm <sup>2</sup> ]
$f_y$	Teräksen myötöraja [N/mm <sup>2</sup> ]
$\gamma_{M0}$	Materiaalin osavarmuusluku (vrt. taulukko 2.1)

Leikkauspinta-ala  $A_v$  voidaan laskea seuraavasti kaavoilla 2.28...2.34 [7, 6.2.6 (3)]:

a) valssaamalla valmistetut I- ja H-profiilit, joissa kuormitus on uuman suuntainen:

$$A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f \quad (2.28)$$

missä

$A$	Profiilin poikkileikkauspinta-ala
$b$	Profiilin laipan leveys
$t_f$	Profiilin laippojen paksuus
$t_w$	Profiilin uuman paksuus
$r$	Profiilin pyöristyksien säde

Kuitenkin vähintään  $\eta h_w t_w$

b) valssaamalla valmistetut U- profiilit, joissa kuormitus on uuman suuntainen:

$$A - 2bt_f + (t_w + r)t_f \quad (2.29)$$

c) valssaamalla valmistetut T- profiilit, joissa kuormitus on uuman suuntainen:

$$0,9(A - bt_f) \quad (2.30)$$

d) hitsaamalla valmistetut I-, H- ja koteloprofiilit, joissa kuormitus on uuman suuntainen:

$$\eta \sum(h_w t_w) \quad (2.31)$$

e) hitsaamalla valmistetut I-, H-, U- ja koteloprofiilit, joissa kuormitus on laippojen suuntainen:

$$A - \sum(h_w t_w) \quad (2.32)$$

f) valssaamalla valmistetut suorakaiteen muotoiset rakenneputket, kun aineenpaksuus on vakio:

$$\text{kuormitus vaikuttaa korkeuden suunnassa:} \quad Ah/(b+h) \quad (2.33)$$

$$\text{kuormitus vaikuttaa leveyden suunnassa:} \quad Ab/(b+h) \quad (2.34)$$

## 2.2.6 Taivutus ja leikkaus

Leikkausvoiman vaikutus taivutusmomenttikestävyyteen otetaan huomioon, kun leikkausvoima on suurempi kuin puolet plastisuusteorian mukaisesta leikkauskestävyydestä. Leikkausvoiman vaikutus täytyy ottaa huomioon myös silloin kun leikkauslommahdus pienentää poikkileikkauksen kestävyttä (ks. EN 1993-1-5). Taivutusmomenttikestävyyttä pienennetään käyttämällä leikkauspinta-alalle pienennettyä myötörajaa. Pienennys tehdään kaavan 2.35 mukaan [7, 6.2.8].

$$(1 - \rho)f_y \quad (2.35)$$

missä  $\rho = \left( \frac{2V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2$  ja  $V_{pl,Rd}$  lasketaan kaavan 2.27 mukaan.

Leikkausvoiman takia pienennetty plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo voidaan vaihtoehtoisesti laskea I-profiilin tapauksessa, jossa laipat ovat yhtä suuret ja taivutus vaikuttaa vahvemman akselin suhteen kaavalla 2.36 [7, kaava 6.30]:

$$M_{y,V,Rd} = \frac{\left[ W_{pl,y} - \frac{\rho A_w^2}{4t_w} \right] f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.36)$$

$$\text{Rajoituksena: } M_{y,V,Rd} \leq M_{y,c,Rd}$$

missä

$M_{y,c,Rd}$  Lasketaan kappaleen 2.2.4 mukaan

$A_w$  Leikkauskestävyyden pinta-ala (kaava 2.37)

$$A_w = h_w t_w \quad (2.37)$$

missä

$h_w$  Profiilin uuman korkeus

$t_w$  Profiilin uuman paksuus

## 2.2.7 Taivutus ja aksiaalinen voima

### Poikkileikkausluokat 1 ja 2

Aksiaalisen voiman vaikutus plastisuusteorian mukaiseen taivutusmomenttikestävyyteen otetaan huomioon. Poikkileikkausluokissa 1 ja 2 pätee kaavan 2.38 ehto [7, kaava 6.31].

$$M_{Ed} \leq M_{N,Rd} \quad (2.38)$$

missä

$M_{Ed}$  Taivutusmomentin mitoitusarvo  
 $M_{N,Rd}$  Plastisuusteorian mukaisen taivutuskestävyyden mitoitusarvo, kun aksiaalisen voiman  $N_{Ed}$  pienentävä vaikutus otetaan huomioon.

Pienennetty plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo  $M_{N,Rd}$  levyille, jossa ei ole kiinnittimien reikiä, lasketaan kaavasta (2.39) [7, kaava 6.32].

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \left[ 1 - (N_{Ed}/N_{pl,Rd})^2 \right] \quad (2.39)$$

Kahden akselin suhteen symmetrisille I- ja H- poikkileikkauksille ja muille vastaaville laipallisille poikkileikkauksille, aksiaalisen voiman vaikutus plastisuusteorian mukaiseen taivutusmomenttikestävyyteen y-y-akselin suhteen voidaan jättää huomioon ottamatta, kun molemmat seuraavat kaavat 2.40 ja 2.41 ovat voimassa [7, 6.2.9.1 (4)]:

$$N_{Ed} \leq 0,25N_{pl,Rd} \quad (2.40)$$

ja

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.41)$$

Kahden akselin suhteen symmetrisille I- ja H-poikkileikkauksille aksiaalisen voiman vaikutus plastisuusteorian mukaiseen taivutusmomenttikestävyyteen z-z-akselin suhteen voidaan jättää huomioon ottamatta, kun kaava 2.42 on voimassa [7, kaava 6.35].

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.42)$$

Kahden akselin pienennetyn taivutusmomenttikestävyyden yhteisvaikutus on huomioitu kaavassa 2.43 [7, kaava 6.41].

$$\left[ \frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right]^\alpha + \left[ \frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} \right]^\beta \leq 1 \quad (2.43)$$

missä  $\alpha$  ja  $\beta$  ovat vakioita, joiden varmalla puolella oleviksi arvoiksi voidaan ottaa arvo 1 tai ne voidaan laskea seuraavasti I- ja H-poikkileikkauksille kaavoilla 2.44 ja 2.45 [7, 6.2.9.1 (5)].

$$\alpha=2 ; \beta = 5n \text{ mutta } \beta \geq 1 \quad (2.44)$$

$$n = N_{Ed}/N_{pl.Rd} \quad (2.45)$$

### Poikkileikkausluokka 3

Kun leikkausvoimaa ei ole, poikkileikkausluokan 3 suurimman aksiaalisen paikallisen jännityksen tulee täyttää ehto (2.46) [7, kaava 6.46].

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.46)$$

missä  $\sigma_{x,Ed}$  on momentista ja aksiaalisesta voimasta aiheutuvan suurimman paikallisen aksiaalisen jännityksen mitoitusarvo ottaen kiinnittimien reiät tarvittaessa huomioon, ks. kappaleet 2.2.3 ja 2.2.4.

### Poikkileikkausluokka 4

Kun leikkausvoimaa ei ole, poikkileikkausluokan 4 tehollisen poikkileikkauksen perusteella lasketun suurimman aksiaalisen paikallisen jännityksen  $\sigma_{x,Ed}$  tulee täyttää ehto 2.47 [7, kaava 6.43].

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.47)$$

missä  $\sigma_{x,Ed}$  on momentista ja aksiaalisesta voimasta aiheutuvan suurimman paikallisen aksiaalisen jännityksen mitoitusarvo ottaen kiinnittimien reiät tarvittaessa huomioon, ks. kappaleet 2.2.3 ja 2.2.4.

Poikkileikkauksen tarkastamiseksi edellinen ehto saadaan muotoon (2.48):

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{W_{eff,y,min} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{W_{eff,z,min} f_y / \gamma_{M0}} \leq 1 \quad (2.48)$$

missä

$A_{eff}$	Poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala, kun tasainen puristus vaikuttaa poikkileikkaukseen
$W_{eff,min}$	Poikkileikkauksen tehollinen taivutusvastus, kun vain momentti vaikuttaa ko. akselin suhteen ja suurin kimmoteorian mukainen jännitys lasketaan profiilin reunan suhteen;
$e_N$	Painopisteakselin siirtyminen, kun poikkileikkaukseen kohdistuu vain tasainen puristus.

**Huom.** Suureiden  $N_{Ed}$ ,  $M_{y,Ed}$ ,  $M_{z,Ed}$  ja  $\Delta M_i = N_{Ed} e_{Ni}$  merkit riippuvat vaikuttavien aksiaalisten jännitysten yhdistelmästä.

## 2.2.8 Taivutus, leikkaus ja aksiaalinen voima

Leikkausvoiman ja aksiaalisen voiman vaikutus momenttikestävyyteen otetaan huomioon. Edellyttäen, että leikkausvoiman mitoitusarvo  $V_{Ed}$  ei ylitä 50 % plastisuusteorian mukaisesta leikkauskestävyyden  $V_{pl,Rd}$  mitoitusarvosta, ei tarvitse tehdä pienennystä momentin ja aksiaalisen voiman kohdan 2.2.7 mukaisiin kestävyyskriittisiin paitsi, jos leikkaukslommahdus pienentää kestävyyttä [7, 6.2.10].

Kun  $V_{Ed}$  ylittää 50 %  $V_{pl,Rd}$ :stä, poikkileikkauksen kestävyuden mitoitusarvo momentin ja normaalivoiman yhdistelmille lasketaan käyttäen pienennettyä myötörajaa. Pienennys saadaan kaavasta 2.49. [7, kaava 6.45].

$$(1 - \rho)f_y \quad (2.49)$$

missä  $\rho = \left( \frac{2V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2$  ja  $V_{pl,Rd}$  lasketaan kaavan 2.27 mukaan.

## 2.2.9 Nurjahduskestävyys

Puristetut sauvat mitoitetaan siten, että ehto 2.50 on voimassa [7, 6.3.1.1].

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.50)$$

missä

$N_{Ed}$	Puristusvoiman mitoitusarvo
$N_{b,Rd}$	Puristetun sauvan nurjahduskestävyyden mitoitusarvo

Epäsymmetristen poikkileikkausluokkaan 4 kuuluvien poikkileikkausten osalta otetaan huomioon tehollisen poikkileikkauksen epäkeskeisyydestä aiheutuva lisämomentti  $\Delta M_{Ed} = N_{Ed} \cdot e_d$ . Puristetun sauvan nurjahduskestävyys saadaan laskettua kaavasta 2.51. [7, 6.3.1.1 ja 6.2.2.5 (4)].

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad (\text{poikkileikkausluokille 1, 2 ja 3}) \quad (2.51)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (\text{poikkileikkausluokassa 4}) \quad (2.52)$$

missä

$\chi$	Nurjahduskestävyyden pienennyskerroin
$A$	Profiilin poikkipinta-ala
$f_y$	Teräksen myötöraja
$\gamma_{M1}$	Sauvan stabiiliisuuden osavarmuusluku
$A_{eff}$	Profiilin tehokaspoikkipinta-ala

Aksiaalisesti puristetuille sauvoille muunnettua hoikkuutta  $\bar{\lambda}$  vastaava pienennystekijä  $\chi$  lasketaan kaavoista 2.53...2.57 käyttäen kyseeseen tulevaa nurjahduskäyrää [7, 6.3.1.2].

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{mutta } \chi \leq 1,0 \quad (2.53)$$

$$\text{missä} \quad \phi = 0,5 \left[ 1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (2.54)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \quad \text{poikkileikkausluokille 1, 2 ja 3;} \quad (2.55)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} \quad \text{poikkileikkausluokille 4;} \quad (2.57)$$

Epätarkkuustekijä ( $\alpha$ ) määräytyy nurjahduskäyrästä, joka puolestaan saadaan nurjahtavan sauvan poikkileikkauksesta. Nurjahduskäyrän valinta on esitetty taulukossa 2.6 ja sen määrittelemä epätarkkuustekijä saadaan taulukosta 2.7 [7, 6.3.1.2]

$N_{cr}$  on kimmoteorian mukainen bruttopoikkileikkauksen mukaan laskettu kriittinen voima kyseeseen tulevassa nurjahdusmuodossa kaavalla 2.58 [14, kaava 2.38].

**Taulukko 2.6** Nurjahduskäyrän valinta poikkileikkauksesta riippuen [7, taulukko 6.2]

Poikkileikkaus		Rajat	Nurjahdus ko. akselin suhteen	Nurjahduskäyrä	
				S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Valsaaut profiilit		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y - y z - z	a a <sub>0</sub>
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y - y z - z	b a
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y - y z - z	b a
			$t_f > 100 \text{ mm}$	y - y z - z	d c
Hitsaut I-profiilit		$t_f \leq 40 \text{ mm}$		y - y z - z	b c
		$t_f > 40 \text{ mm}$		y - y z - z	c d
Rakennepu- ket		Kuumamuovattu		Kaikki	a
		Kylmämuovattu		Kaikki	c
Hitsaut kotel- profiilit		Yleensä (poikkeus, ks. alla)		Kaikki	b
		Paksut hitsit: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$		Kaikki	c
U-, T- ja un- piprofiilit				Kaikki	c
L-teräkset				Kaikki	b

**Taulukko 2.7** Nurjahduskäyrien epätarkkuustekijät [7, taulukko 6.1]

Nurjahduskäyrä	a <sub>0</sub>	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Kimmenteorian mukainen kriittinen nurjahduskuorma  $N_{cr}$ :





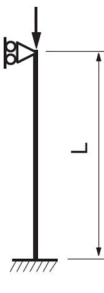
$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 EA}{(L_{cr}/i)^2} \quad \text{missä: } i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (2.58)$$

missä

E	Kimmokerroin
I	Poikkileikkauksen neliömomentti tutkittavaan suuntaan
$L_{cr}$	Sauvan nurjahduspituus tarkasteltavaan suuntaan (vrt. taulukko 2.8 nurjahduspituuden määrittämisestä)
A	Profiilin poikkipinta-ala
i	Poikkileikkauksen hitaussäde tarkasteltavan akselin suuntaan

Mikäli muunnettu hoikkuus  $\bar{\lambda} \leq 0,2$  tai kun  $\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq 0,04$  nurjahdusta ei tarvitse tarkistaa ja pelkkä poikkileikkauksen tarkistus on riittävä.

**Taulukko 2.8** Nurjahduspituuden määrittäminen [3, taulukko 7.8]

Molemmista päistä nivelöity pilari	Toisesta päästä jäykästi kiinnitetty pilari	Molemmista päistä jäykästi kiinnitetty pilari	Molemmista päistä jäykästi kiinnitetty pilari, toinen kiinnityskohta sivusiirtävä	Toisesta päästä jäykästi kiinnitetty ja toisesta päästä nivelöity pilari
				
$L_{cr} = 1,0 L$	$L_{cr} = 2,0 L$	$L_{cr} = 0,5 L$	$L_{cr} = 1,0 L$	$L_{cr} = 0,7 L$

### 2.2.10 Leikkausviiveilmiö (Shear-lag)

Taivutusteoriassa oletetaan poikkileikkauksen säilyvän tasossa palkin taipuessa. Leveälaippaisilla palkeilla ilmenee kuitenkin leikkausviivettä, jolloin laipassa vaikuttavien leikkausjännitysten ja niiden liittyvien muodonmuutosten takia uumasta kaukana olevat laipan reuna-alueet jäävät uumasta jälkeen. Tämä tarkoittaa pienentynyttä aksiaalista venymää ja siten jännitystä uumaan verrattuna. Tämä huomioidaan rajoittamalla laipan tehokasta leveyttä. [9, luku 2.5].

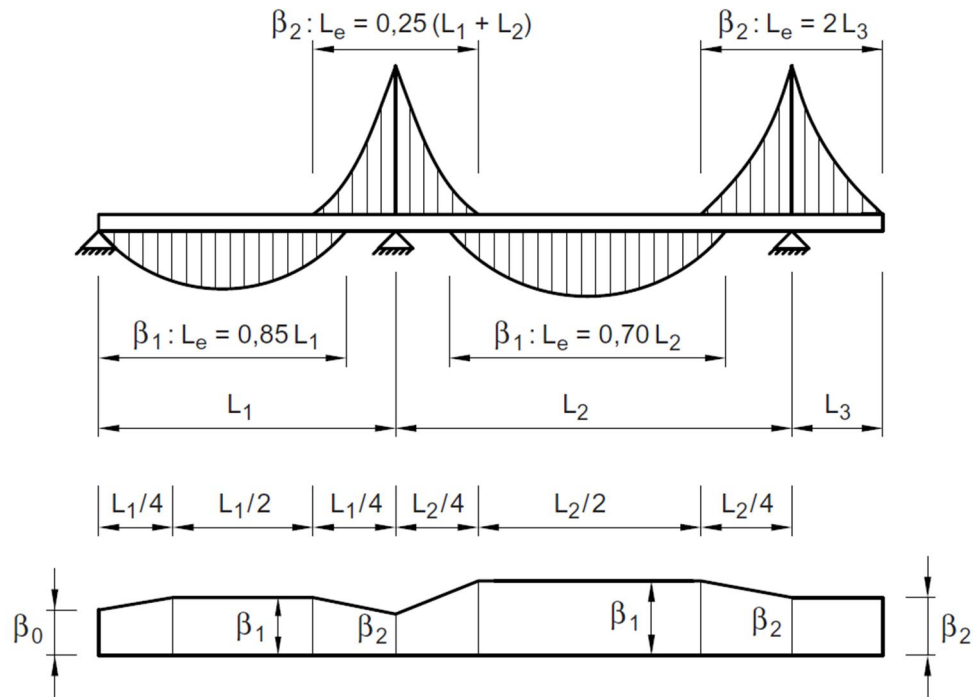
Leikkausviivettä ei tarvitse ottaa huomioon, jos kaava 2.59 toteutuu [6, 3.1 (1)]

$$b_0 < L_e/50 \quad (2.59)$$

missä

$b_0$	Laipan leveys yhdeltä reunalta tuettaessa koko taso-osan leveys, ja kahdelta reunalta tuettuna puolet taso-osan leveydestä
$L_e$	Taivutusmomenttien nollakohtien välinen etäisyys (kuva 2.4)





**Kuva 2.4** Momentin nollakohtien etäisyyksien  $L_e$  määrittäminen [14, kuva 2.6].

Tehollinen leveys  $b_{eff}$  määritetään kaavalla 2.60 [9, luku 2.5].

$$b_{eff} = \beta b_0 \quad (2.60)$$

missä

$b_{eff}$	Shear lag-ilmiöstä johtuva tehollinen leveys
$b_0$	Laipan leveys yhdeltä reunalta tuettaessa koko taso-osan leveys, ja kahdelta reunalta tuettuna puolet taso-osan leveydestä
$\beta$	Tehollisen leveyden pienennystekijä (vrt. taulukko 2.9)

Tehollisen leveyden pienennystekijän  $\beta$  laskemiseksi tarvitaan kaavoja 2.61 ja 2.62 sekä taulukkoa 2.9 [14, 2.5].

$$\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{sl}}{b_0 t}} \quad (2.61)$$

$$\kappa = \frac{\alpha_0 b_0}{L_e} \quad (2.62)$$

missä

$A_{sl}$	Kaikkien pituusjäykisteiden pinta-ala pituuden $b_0$ matkalla Mikäli ei ole pituusjäykisteitä $\rightarrow \alpha_0 = 1$ .
$t$	Tutkitavan levyn paksuus

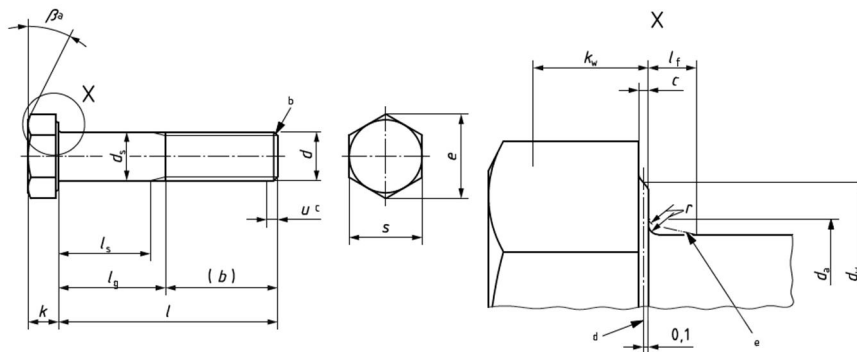
**Taulukko 2.9** Tehollisen leveyden pienennystekijä  $\beta$  [14, taulukko 2.12]

$\kappa$	Tarkasteltava kohta	$\beta$ -arvo
$\kappa \leq 0,02$		$\beta = 1,0$
$0,02 < \kappa \leq 0,70$	Positiivinen momentti (ks. kuva 2.6)	$\beta = \beta_1 = \frac{l}{l + 6,4\kappa^2}$
	Negatiivinen momentti (ks. kuva 2.6)	$\beta = \beta_2 = \frac{l}{l + 6,0\left(\kappa - \frac{l}{2500\kappa}\right) + 1,6\kappa^2}$
$\kappa > 0,70$	Positiivinen momentti (ks. kuva 2.6)	$\beta = \beta_1 = \frac{l}{5,9\kappa}$
	Negatiivinen momentti (ks. kuva 2.6)	$\beta = \beta_2 = \frac{l}{8,6\kappa}$
Kaikilla $\kappa$ :n arvoilla	Päätytuki (ks. kuva 2.6)	$\beta_0 = (0,55 + 0,025/\kappa)\beta_1$ , mutta $\beta_0 < \beta_1$
Kaikilla $\kappa$ :n arvoilla	Uloke (ks. kuva 2.6)	$\beta = \beta_2$ väli- ja päätytuilla

## 2.3 Ruuvikiinnitys

### 2.3.1 Ruuvikiinnityksestä yleisesti

Tämän työn ruuviliitoslaskennassa käytetään, esijännittämättömissä rakenteellisissa ruuvikokoonpanoissa, standardin ISO 4014 mukaisia osakierteisiä ruuveja (koko  $\geq M20$ ). Täyskierteiset ruuvit ovat alle M20 kokoluokan ruuveja. Periaatepäätöksenä, alle M16 ruuveja ei huomioida voimaliitosten mitoituksessa. Kohteen projektieritelmän mukaisesti, käytettävien pulttien lujuusluokat rajoitetaan 8.8 ja 10.9 [11, 5.6.3]. Esijännitettävät rakenteelliset kokoonpanot ovat standardin EN 14399-1 mukaisia [11, 5.6.4]. Osakierteisen ruuvin ruuvien geometrinen mitoitus on havainnollistettu kuvassa 2.5 [16, kuva1].

**Kuva 2.5** ISO4014 ruuvin mitoitus [16, kuva 1]

Tähän työhön valittujen ruuvien 8.8 ja 10.9 lujuusluokkien myötörajan  $f_{yb}$  ja vetomurto-  
lujuuden  $f_{ub}$  nimellisarvot ovat esitelty taulukossa 2.10 [1, taulukko 3.1].

**Taulukko 2.10** Ruuvien  $f_{yb}$  ja  $f_{ub}$  nimellisarvot [1, taulukko 3.1]

Ruuvien lujuusluokka	8.8	10.9
$f_{yb}$ (N/mm <sup>2</sup> )	640	900
$f_{ub}$ (N/mm <sup>2</sup> )	800	1000

Tämän työn rajoituksessa kohteen toteutuseritelmän valitsemiin kiinnikkeisiin, mitoitetta-  
viksi mutteriksi on valittu standardin ISO 4032 ja aluslevyiksi standardin ISO 7091 mu-  
kaiset osat [11, 5.6.3]. Ruuvien nimelliset välykset on esitetty taulukossa 2.11 [2, tau-  
lukko 11].

**Taulukko 2.11** Nimellisvälykset ruuveille [2, taulukko 11]

Ruuvien halkaisija	16	20	24	27	30
Pyöreät reiät	2	2	2	3	3
Reiän halkaisija $d_0$	18	22	26	30	33

Taulukossa 2.12 on esitetty ruuvien poikkipinta-alat kierteiselle ja kierteettömällä poik-  
kipinta-alalle.

**Taulukko 2.12** Ruuvien poikkipinta-ala

Ruuvien halkaisija	16	20	24	27	30
Kierteettömän osan pinta-ala [mm <sup>2</sup> ]	201	314	452	573	707
Kierteisen osan pinta-ala [mm <sup>2</sup> ]	157	245	353	459	561

### 2.3.2 Ruuvikiinnitysluokat

Eurokoodi 3:ssa on ruuviliitokset jaettu viiteen ruuvikiinnitysluokkaan. Leikkausvoiman  
rasittamat kiinnitykset kuuluvat A, B tai C – luokkaan ja vetovoiman rasittamat kiinni-  
tykset kuuluvat D ja E – luokkaan [1, 3.4].

A-kiinnitysluokassa ruuveja ei ole esijännitetty, joten liitoskappaleet pystyvät laskennal-  
lisessa näkökulmassa liukumaan toisiinsa nähden vapaasti. Tässä tilanteessa liitosvoima  
kulkevat kiinnittävän pultin varren välityksellä liitoslevyihin. Liitoksen mitoituksellinen  
kapasiteetti riippuu pultin leikkauskestävyydestä  $F_{V,Rd}$  ja liitoslevyjen reunapuristuskes-  
tävyydestä  $F_{b,Rd}$  [1, taulukko 3.2, taulukko 3.4].

B-kiinnitysluokassa ruuvien kiristysvoima puristaa liitoskappaleita yhteen niin suurella  
voimalla, ettei liitoksen oleteta liukuvan käyttörajatilassa. Liitos mitoitetaan kestävä-  
n murtorajatilassa pultin leikkauskapasiteetin  $F_{V,Rd}$  ja liitoskappaleiden reunapuristuskes-  
tävyyden  $F_{b,Rd}$  avulla.

vyyden mukaan  $F_{b,Rd}$ . Käyttörajatilassa liitoksen kestävyys tarkistetaan liitoslevyjen liukumiskestävyydelle  $F_{s,Rd,ser}$  käyttörajatilassa kuormille [1, taulukko 3.2, taulukko 3.4]. Esijännitys rajoittaa ruuvien lujuusluokiksi 8.8 ja 10.9.

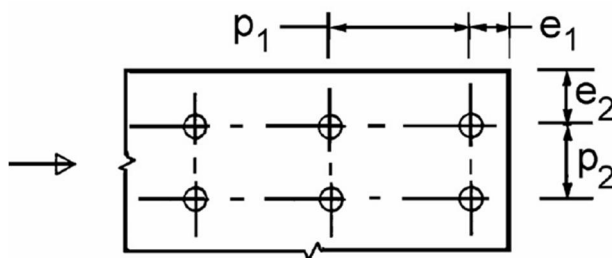
C-kiinnitysluokassa liitoksen oletetaan kestävä liukumatta murtorajatilassa. Tässä tilanteessa leikkaavat rasitukset eivät kulje pultin varren välityksellä. Liitos tarkistetaan sen liukumiskestävyydelle  $F_{s,Rd}$  [1, 3.9], liitososien reunapuristuskestävyydelle  $F_{b,Rd}$  [1, taulukko 3.4] ja liitososan nettopinta-alaiselle vetokestävyydelle  $N_{net,Rd}$  [1, 3.4.1(1)c].

D-kiinnitysluokassa ruuvi on vetorasitettu. Kiinnitys on tehty normaalissa asennusmomentissa ja ei täytä esijännitykseen vaadittavaa voimaa. Ruuvi mitoitetaan sen vetokestävyydelle  $F_{t,Rd}$  [1, 3.9] ja liitososat lävistysmurrolle  $B_{p,Rd}$  [1, taulukko 3.4]. Ruuvien vetokapasiteettia laskettaessa on tarkistettava mahdolliset vipuvaikutukset, jotka voivat lisätä ruuviin tulevia rasituksia [1, 3.11].

E-kiinnitysluokassa ruuvi on esijännitetty ja vetorasitettu. Ruuvi mitoitetaan D-luokan mukaisesti ruuvien vetokestävyydelle  $F_{t,Rd}$  [1, 3.9] ja kiinnityskappaleiden lävistysmurrolle  $B_{p,Rd}$  [1, taulukko 3.4]. Ruuvien vetokapasiteettia laskettaessa on tarkistettava mahdolliset vipuvaikutukset, jotka voivat lisätä ruuviin tulevia rasituksia [1, 3.11].

### 2.3.3 Ruuvien sijainti

Teräsrakenteiden suunnittelua ohjaava eurokoodi (EC3), rajoittaa ruuvien keskiöväliä sekä reunaetäisyydet. Mikäli etäisyydet ovat pienempiä kuin suositukset, liitosmitoituksen kaavat pienentävät liitoksen kapasiteettia ja kun etäisyydet menevät alle minimiarvojen, ne menettävät kapasiteettinsa täysin. Ruuvien reunaetäisyyksien mitoitusmerkinnät on esitetty kuvassa 2.6 ja minimiarvot on esitetty taulukossa 2.13 [1 taulukko 3.3, 8 taulukko 8.1]. Minimiarvo 1 on ruuvien normaalit keskinäiset ja reunaetäisyydet [1 taulukko 3.3]. Rakenteiden väsymisluokan määrittämiselle EN 1993-1-8 taulukon 8.1 mukaan, edellyttää pienimmiksi reuna-, ja keskiöetäisyyksiksi taulukon 2.13 minimiarvo 2 arvoja.



**Kuva 2.6** Ruuvien etäisyyksien merkinnät [1, osa kuvasta 3.1]

**Taulukko 2.13** Minimi keskiöväliä sekä reunaetäisyydet [1 taulukko 3.3, 8 taulukko 8.1]

Etäisyys	$e_1$	$p_1$	$e_2$	$p_2$
Minimiarvo 1	$1,2d_0$	$2,2d_0$	$1,2d_0$	$2,4d_0$
Minimiarvo 2	$1,5d_0$	$2,5d_0$	$1,5d_0$	$2,5d_0$

### 2.3.4 Leikkauskestävyys

Ruuvien leikkauskestävyys ( $F_{v,Rd}$ ) yhtä leikettä kohti lasketaan kaavalla 2.63 [1, 3.4].

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \quad (2.63)$$

missä

- $\alpha_v$  = 0,6 lujuusluokassa 8.8  
= 0,5 lujuusluokassa 10.9  
= 0,6 kun ruuvien kierteetön osa on leikkaustasossa
- $f_{ub}$  Ruuvien vetomurtokestävyys (vrt. taulukko 2.10)
- $A$  Ruuvien poikkileikkauspinta-ala leikkaustasossa
- $\gamma_{M2}$  Ruuvien kestävyuden osavarmuusluku (vrt. taulukko 2.1)

### 2.3.5 Reunapuristuskestävyys

Reunapuristuskestävyys ( $F_{b,Rd}$ ) lasketaan kaavalla 2.64 [1, taulukko 3.4].

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_d f_u d t}{\gamma_{M2}} \quad (2.64)$$

missä

- $\alpha_d$  On pienin arvoista  $\alpha_d: \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0$   
siirrettävän voiman suunnassa:  
-levyn pään ruuveille:  $\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0}$   
-muille kuin pään ruuveille:  $\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$
- $k_1$  Kohtisuorassa suunnassa siirrettävään voimaan nähden:  
-reunarivin ruuveille:  $k_1$  on pienin arvoista  $2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5$   
-muille kuin pään ruuveille:  $k_1$  on pienin arvoista  $1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5$   
= 0,6 kun ruuvien kierteetön osa on leikkaustasossa
- $f_u$  Levyn vetomurtokestävyys (vrt. taulukko 2.2)
- $d$  Ruuvien halkaisija
- $t$  Levyn paksuus
- $\gamma_{M2}$  Ruuvien kestävyuden osavarmuusluku (vrt. taulukko 2.1)

### 2.3.6 Liukumiskestävyys

Liukumiskestävyys ( $F_{s,Rd}$ ) esijännitetyille ruuveille 8.8 ja 10.9 lujuusluokissa lasketaan kaavalla 2.65 [1, kaava 3.6].

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s * n * \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C} \quad (2.65)$$

missä

- $k_s$  Normaaaleissa pyöreissä rei`issä 1 [1, taulukko 3.6]
- $n$  Kitkapintojen lukumäärä
- $\mu$  Kitkakerroin (vrt. taulukko 2.14)
- $\gamma_{M3}$  Liukumiskestävyuden osavarmuusluku murtorajatilassa kiinnitysluokassa C (vrt. taulukko 2.1)
- $F_{p,C}$  Esijännitysvoima (vrt. kaava 2.66)

**Taulukko 2.14** Kitkapintojen luokat [2, taulukko 18]

Luokka	Pintakäsittely	Kitkakerroin $\mu$
A	Pinnat, joilta irtonainen ruoste on poistettu hiekka- tai teräsräpuhalluksella, ei pistemäisiä syöpymiä.	0,50
B	Hiekalla tai teräsrakeilla puhalletut pinnat: a) Alumiini- tai sinkkipohjaisella tuotteella ruiskupäällystetty pinta b) Alkali- tai alkali-sinkkimaali, jonka paksuus on 50 $\mu\text{m}$ ...80 $\mu\text{m}$ .	0,40
C	Teräsharjalla tai liekkipuhalluksella puhdistetut pinnat, irtonainen ruoste poistettu.	0,30
D	Käsittelemättömät pinnat.	0,20

Esijännitysvoiman ( $F_{p,C}$ ) mitoitusarvo lasketaan kaavalla 2.66 [1, kaava 3.7]

$$F_{p,C} = 0,7 * f_{ub} * A_s \quad (2.66)$$

missä

- $f_{ub}$  Ruuvien vetomurtokestävyys (vrt. taulukko 2.10)
- $A_s$  Ruuvien poikkileikkauspinta-ala (kierteinen osa)

### 2.3.7 Poikkileikkauksen vetokestävyys

Ruuvikiinnitysluokassa C, nettopoikkileikkauksen vetokestävyys mitoitusarvoksi ( $N_{t,Rd}$ ) lasketaan kiinnittimien reikien kohdalle kaavalla 2.67 laskettu  $N_{net,Rd}$  [7, kaava 6.8].

$$N_{net,Rd} = \frac{A_{net} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.67)$$

missä

$A_{net}$	Liitoslevyn nettopoikkileikkaus
$f_y$	Teräksen myötöraja
$\gamma_{M0}$	Materiaalin osavarmuusluku (vrt. taulukko 2.1)

### 2.3.8 Ruuvien vetokestävyys

Ruuvien vetokestävyys ( $F_{t,Rd}$ ) lasketaan kaavalla 2.68 [1, taulukko 3.4].

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (2.68)$$

missä

$k_2$	on 0,63 uppokantaisille ruuveille, muissa tapauksissa $k_2 = 0,9$ [1, taulukko 3.4]
$f_{ub}$	Ruuvien vetomurtokestävyys (vrt. taulukko 2.10)
$A_s$	Ruuvien poikkileikkauspinta-ala (kierteinen osa)
$\gamma_{M2}$	Ruuvien kestävyys osavarmuusluku (vrt. taulukko 2.1)

### 2.3.9 Ruuvien ja mutterin lävistymiskestävyys

Ruuvien ja mutterin lävistymiskestävyys ( $B_{p,Rd}$ ) lasketaan kaavalla 2.69 [1, taulukko 3.4].

$$B_{p,Rd} = 0,6 \pi d_m t_p f_u / \gamma_{M2} \quad (2.69)$$

missä

$d_m$	Ruuvien kannan tai mutterin etäisempien pisteiden ja avainvälin keskiarvo (vrt. taulukko 2.15, seuraavalla sivulla)
$t_p$	Levyn paksuus
$f_u$	Levyn vetomurtokestävyys (vrt. taulukko 2.2)
$\gamma_{M2}$	Ruuvien kestävyys osavarmuusluku (vrt. taulukko 2.1)

**Taulukko 2.15**  $d_m$  ja  $A_s$ 

Ruuvi	$d_m$ [mm]	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]
M16	25	157
M20	31	245
M24	37	353
M27	43	459
M30	48	561

### 2.3.10 Yhdistetty leikkaus- ja vetovoima

Yhdistetty leikkaus- ja vetovoima lasketaan kaavalla 2.70 [1, taulukko 3.4].

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.70)$$

missä

$F_{v,Ed}$  Leikkausvoiman mitoitusarvo

$F_{v,Rd}$  Leikkausvoiman kestävyys

$F_{t,Ed}$  Vetovoiman mitoitusarvo

$F_{t,Rd}$  Vetovoiman kestävyys

### 2.3.11 Yhdistetty veto ja leikkaus kiinnitysluokassa C

Jos liukumisen kestävä kiinnitys rasittaa leikkauksen lisäksi vetovoima, liukumiskestävyyden mitoitusarvo ( $F_{s,Rd}$ ) lasketaan kaavalla 2.71 [1, kaava 3.8b].

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s * n * \mu (F_{p,C} - 0,8F_{t,Rd})}{\gamma_{M3}} \quad (2.71)$$

missä

$k_s$  Normaaaleissa pyöreissä rei'issä 1 [1, taulukko 3.6]

$n$  Kitkapintojen lukumäärä

$\mu$  Kitkakerroin (vrt. taulukko 2.14)

$F_{p,C}$  Esijännitysvoima (vrt. kaava 2.66)

$F_{t,Rd}$  Ruuvien vetokestävyys (vrt. kaava 2.68)

$\gamma_{M3}$  Liukumiskestävyyden osavarmuusluku murtorajatilassa kiinnitysluokassa C (vrt. taulukko 2.1)



### 2.3.12 Palamurtuminen

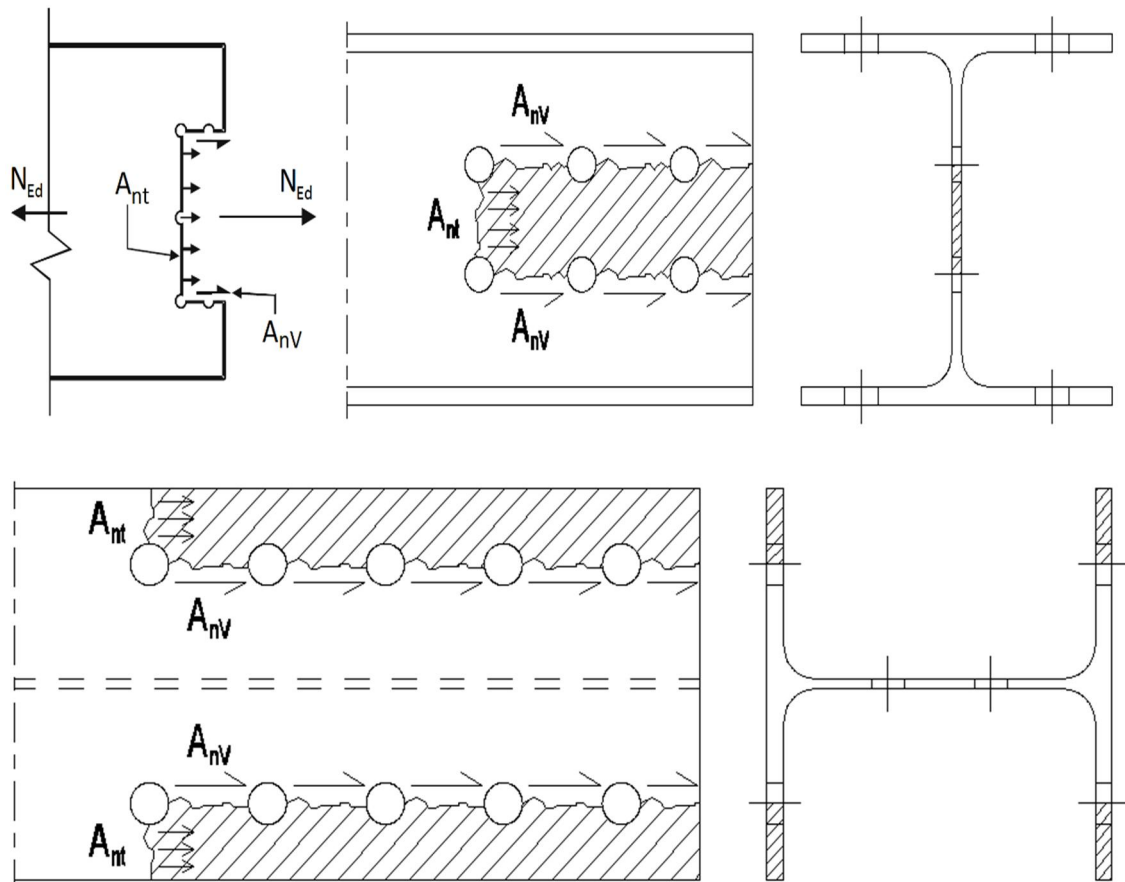
Palamurtuminen koostuu perusaineen leikkaus ja vetomurtumisesta pulttien keskilinjoihin pitkin kulkevalla murtolinjalla. Keskeisesti rasitetun symmetrisen pulttiryhmän palamurtuminen lasketaan kaavalla 2.72 [1, kaava 3.9].

$$V_{eff,1,Rd} = f_u A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) f_y A_{nv} / \gamma_{M0} \quad (2.72)$$

missä

$A_{nt}$  Vedon rasittama nettopinta-ala (vrt. kuva 2.7)

$A_{nv}$  Leikkauksen rasittama nettopinta-ala (vrt. kuva 2.7)

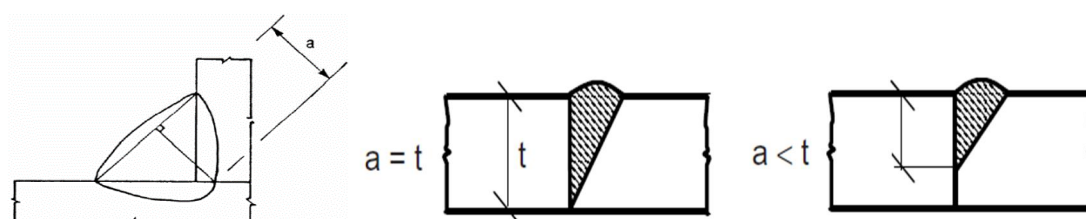


**Kuva 2.7** Palamurtumisen pinta-alat

## 2.4 Hitsiliitokset

### 2.4.1 Hitsiliitokset yleisesti

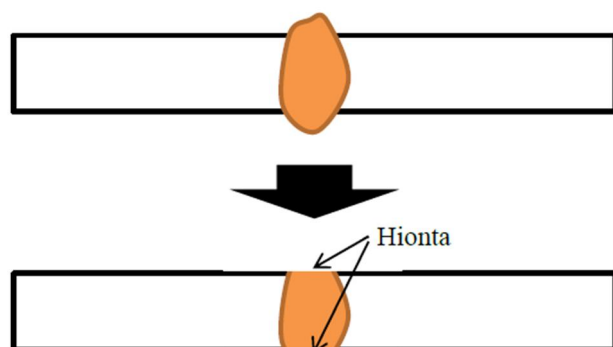
Tämän työn pääpaino on liitosten mitoituksessa, kustannuslaskennassa ja väsymiskestävyyden arvioinnissa. Tutkittavissa liitosvaihtoehdoissa on vältetty työmaahitsejä laadun varmistamiseksi. Hitsien mitoitus suoritetaan eurokoodien 1993-1-8 kappaleen 4 mukaan [1]. Voimia siirtävien hitsiliitosten minimi  $a$ -mitaksi oletetaan 3 mm (vrt. kuva 2.8) ja liitettävien kappaleiden minimi paksuudeksi 4 mm. Tässä kappaleessa perehdytään vain piena- sekä V hitseihin. Hitsiliitosten kustannusvaikutuksia on esitetty kappaleissa 3.3.3 ja 3.3.7.



**Kuva 2.8**  $a$ -mitta piena- ja puoli V hitseissä [1 kuva 4.4 ja 14 kuva 3.25]

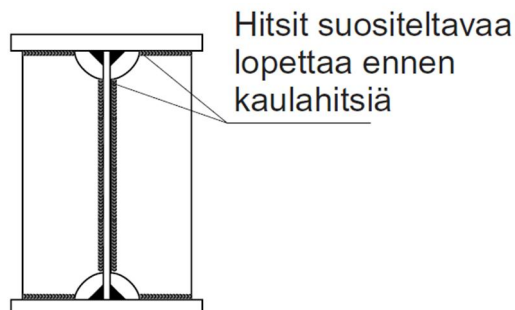
### 2.4.2 Hitsiliitosten väsymissuunnittelu

Hitsit sisältävät aina mikroskooppisia virheitä, halkeamia ja jälkijännityksiä. Väsyttävässä kuormituksessa nämä pienet halkeamat ja jännityspiikit kehittyvät väsymisvaurion kautta lopulta hitsin murtotilanteeseen. Vaurion syntymiseen vaikuttaa hitsauksen laatu, rakenteen massavaihtelusta aiheutuvat jäykkyydenvaihtelut, hitsauksen sijainti levyn valssisuuntaan nähden, hitsauksen aiheuttamien lämpövaihteluiden aiheuttamat jälkijännitykset, väsyttävän kuormituksen jännitysvaihtelut, sekä niiden toistuvuus rakenteen oletetun käyttöiän aikana. Hitsin aiheuttaman massan vaihtelu voidaan minimoida hitsien hionnalla (vrt. kuva 2.9).



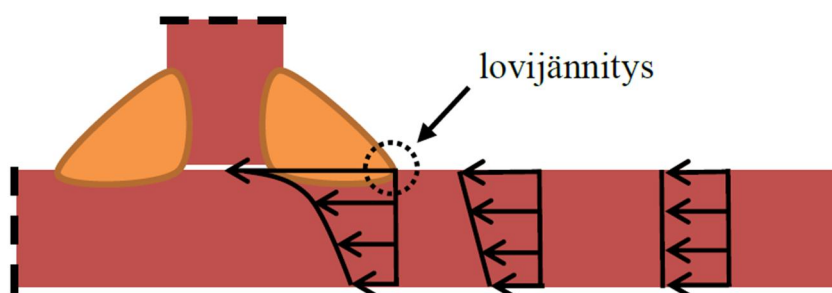
**Kuva 2.9** Hitsien hionta jännityshuippujen tasaamiseksi [17 kuva 2.7]

Pienahitsien korkea kupu kasvattaa jännityshuippuja, joten matala tai jopa kovera hitsikupu pienentää tätä ilmiötä. Rakenteelle vaarallisten väsymishalkeamien alku voi olla myös sekundäärisissä varusteluosista. On siis olennaista välttää turhia lisärasituksia voimaliitoksille kuten kuvassa 2.10 on esitetty [14 kuva 4.12].

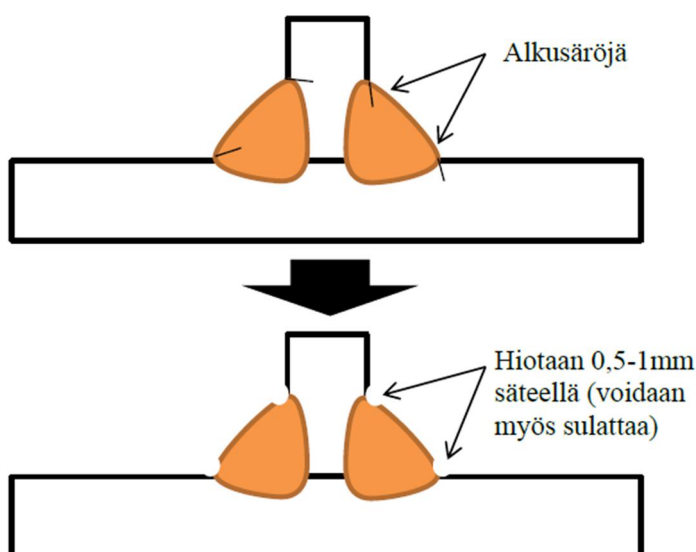


**Kuva 2.10** Varusteluosan hitsien sijoitus [14 kuva 4.12]

Liittyvän osan ja hitsin rajapinta on yleinen paikka väsymisvaurioon kehittyville alkusäröille ja niitä pahentaville jännityshuipuille. Pienahitsien jännityshuippujen syntyminen on esitetty kuvassa 2.11 [17 kuva 3.19]. Alkusäröt voidaan minimoida hiomalla hitsin rajapinnasta 0,5...1 mm kuvan 2.12 mukaisesti [17 kappale 2.2.1].

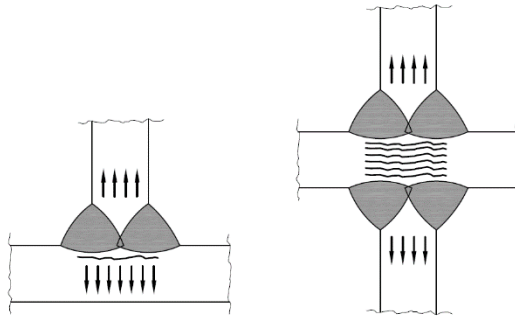


**Kuva 2.11** Pienahitsien aiheuttama jännityshuippu [17 kuva3.19]



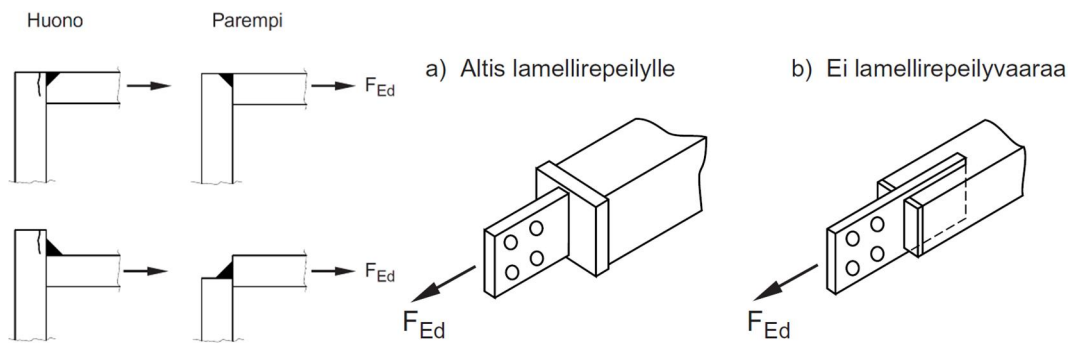
**Kuva 2.12** Pienahitsin alkusäröjen poisto [17 kuva 2.8]

Hisauksen epäsuotuisalla sijainnilla ja levyn valssisuuntaan kohtisuoraan vastaan olevalla vetojännityksellä voidaan aiheuttaa kuvassa 2.13 [14 kuva 5.1] esiintyvää lamellirepeytymistä.



**Kuva 2.13** Lamellirepeily hitsausliitoksen alla.

Käytännön suunnittelussa lamellirepeämisen riski on pienennettävissä erityisesti rakenteellisilla ratkaisuilla. Esimerkki tapauksia on näytetty kuvassa 2.14 [14 kuvat 5.3 ja 5.4].



**Kuva 2.14** Esimerkkejä lamellirepeämisen rakenteellisista vaihtoehdoista.

Hitsausluokka määrittelee sallittujen virheiden määrää ja hitsauksen laatua yleisesti. Hitsausluokat on määritelty standardissa EN ISO 5817. Hitsausluokan valinta toteutusluokan mukaan on esitetty taulukossa 2.16 [14 taulukko 3.22].

**Taulukko 2.16** Hitsausluokan valinta [14 taulukko 3.22]

	Toteutusluokka (EN 1090-2)			
	EXC1	EXC2	EXC3	EXC4
Hitsausluokka <sup>a)</sup>	Luokka D (jos vaaditaan)	Luokka C <sup>b)</sup>	Luokka B	Luokka B+ <sup>c)</sup>
<p>a) Standardin EN ISO 5817 mukainen hitsausluokka lukuun ottamatta virhetyppejä:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- "Jyrkkä liittyminen" (505)</li> <li>- "Mikroliitosvirhe" (401)</li> </ul> <p>joita ei oteta huomioon.</p> <p>b) Yleensä hitsausluokka C, paitsi hitsausluokka D seuraaville virhetyppeille:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- "Reunahaava" (5011,5012)</li> <li>- "Pintapalon valuma" (506)</li> <li>- "Sytytysjälki" (601)</li> <li>- "Avoin imuontelo" (2025)</li> </ul> <p>c) Hitsausluokka B, sekä lisävaatimukset EN 1090-2 taulukon 17 mukaisesti.</p>				

Hitsausluokan parannus kasvattaa vaadittujen hitsauksien tarkastuksien määrää, mahdollistaen rakenteellisten virheiden havaitsemisen valmistus vaiheessa. Tasalaatuisempi hitsaus on kestävämpi väsyttävässä kuormituksessa. Normaalitilanteessa hitsausluokka ei vaikuta mitoituskeinoon. Hitsausluokan asettamat vaatimukset ovat vähimmäistaso tarkastuksille. Kohde kohtaisesti väsyttävässä kuormituksessa ja rakenteellisen kantavuuden kannalta kriittisessä kohdassa voi olla perusteltua vaatia laajempaa laadunvarmistusta. Rakennesuunnittelija voi tarvittaessa vaatia kriittisten kohtien hitsausseamien 100 % ultraääni tarkastuksia. Hitsiluokkien perusteella muun kuin silmämääräisten NDT (rikko-mattomien aineenkoestusten) tarkastusten laajuudet on esitetty taulukossa 2.17 [2 taulukko 24].

**Taulukko 2.17** Muun kuin silmämääräisen tarkastuksen laajuus [2 taulukko 24]

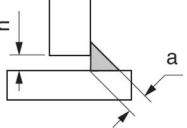
Hitsin tyyppi	Konepaja- ja työmaahitsit		
	EXC2	EXC3	EXC4
Poikittaiset päittäishitsit ja osittain läpihitsatut päittäishitsit, joihin kohdistuu vetojännitys:  $U \geq 0,5$  $U < 0,5$	10 %  0 %	20 %  10 %	100 %  50 %
Poikittaiset päittäishitsit ja osittain läpihitsatut hitsit:  ristiliitoksissa  T-liitoksissa	10 %  5 %	20 %  10 %	100 %  50 %
Poikittaiset pienahitsit, joihin kohdistuu vetoa tai leikkausta:  Kun $a > 12 \text{ mm}$ tai $t > 20 \text{ mm}$  Kun $a \leq 12 \text{ mm}$ ja $t \leq 20 \text{ mm}$	5 %  0 %	10 %  5 %	20 %  10 %
<b> A1&gt;</b> Läpihitsatut pitkittäiset hitsit nosturin kannattajien uuman ja ylälaipan välissä:	10 %	20 %	100 %
Muut pitkittäiset hitsit ja jäykisteiden hitsit	0 %	5 %	10 % <b>&lt;A1 </b>
HUOM. 1 Kokoonpanon akselin suuntaiset hitsit katsotaan pitkittäisiksi. Kaikki muut katsotaan poikittaishitseiksi. HUOM. 2 $U$ = hitsien hyväksikäyttöaste kvasistaattisluontoisille kuormille. $U = E_g / R_g$ , missä $E_g$ on hitsin suurin kuormavaikutus ja $R_g$ on hitsin kestävyys murtorajatilassa. HUOM. 3 Suureet $a$ ja $t$ viittaavat pienahitsin $a$ mittaan ja liitettävien materiaalien enimmäispaksuuteen.			

### 2.4.3 Hitsin mitoitus

Hitsiliitoksilta vaaditaan riittävää muodonmuutoskykyä. Mikäli kiinnittyvään rakenteeseen oletetaan plastinen nivel, hitsausliitoksen täytyy olla vähintään yhtä kestävä kuin heikoin liitettävä osa. Tämä estää hitsausta murtumasta plastisessa tilanteessa. Tällaista liittyvien osien lujuuteen suunniteltuja hitsauksia kutsutaan yleisesti tasalujiksi hitseiksi. Hitsauksen  $a$ -mittaa määriteltäessä voi liittyvien osien toleranssit asettaa lisävaatimuksia. Esimerkkinä ristikon diagonaali, joka on valmistustoleranssien rajoissa lyhyt viereisiin

diagonaaleihin nähden. Tämä voi aiheuttaa 2...4 mm raon liitettävään osaan. Tällöin puhtaasti mitoituksellisesti valittu a-mitta ei todellisuudessa anna tasalujaa liitosta, kuten taulukossa 2.18 on esitetty. Liitoksissa, missä vastaava toleranssien sisällä oleva rako on mahdollinen, on perusteltua käyttää a-mitalle korotuskerrointa 1,2.

**Taulukko 2.18** Vajaan hitsauksen sallittu sovitusvirhe [14 taulukko 8.9]

Virhetyyppi ISO 6520-1		Hitsausluokka (EN ISO 5817)		
		D a) Tyydyttävä	C Hyvä	B Vaativa
617 Sovitusvirhe $t > 3 \text{ mm}$		$h \leq 1 \text{ mm} + 0,3a$ max 4 mm	$h \leq 0,5 \text{ mm} + 0,2a$ max 3 mm	$h \leq 0,5 \text{ mm} + 0,1a$ max 2 mm
		Systemaattinen virhe h-mitassa sallitaan tietyissä tilanteissa, joissa virhe voidaan kompensoida vastaavasti a-mittaa kasvattamalla, ks. EN 1090-2: kohta 7.5.8.1		

Pienahitsien mitoituksen ehto on esitetty kaavalla 2.73 [1 kaava 4.2].

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \quad (2.73)$$

missä

$F_{w,Ed}$  Hitsin pituusyksikköä kohti vaikuttavan voiman mitoitusarvo  
 $F_{w,Rd}$  Hitsin kestävyuden mitoitusarvo pituusyksikköä kohti

Pienahitsin kestävyuden mitoitusarvo rasituksen suunnasta riippumatta on laskettavissa kaavalla 2.74 [1 kaava 4.3].

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} a \quad (2.74)$$

missä

$f_{vw,d}$  Hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo

Pienahitsien leikkauslujuuden mitoitus on esitetty kaavalla 2.75 [1 kaava 4.4].

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (2.75)$$

missä

$f_u$  Levyn vetomurtokestävyys (vrt. taulukko 2.2)  
 $\beta_w$  Pienahitsien korrelaatiokerroin (taulukko 2.19)  
 $\gamma_{M2}$  Hitsien osavarmuusluku murtorajatilassa (taulukko 2.1)

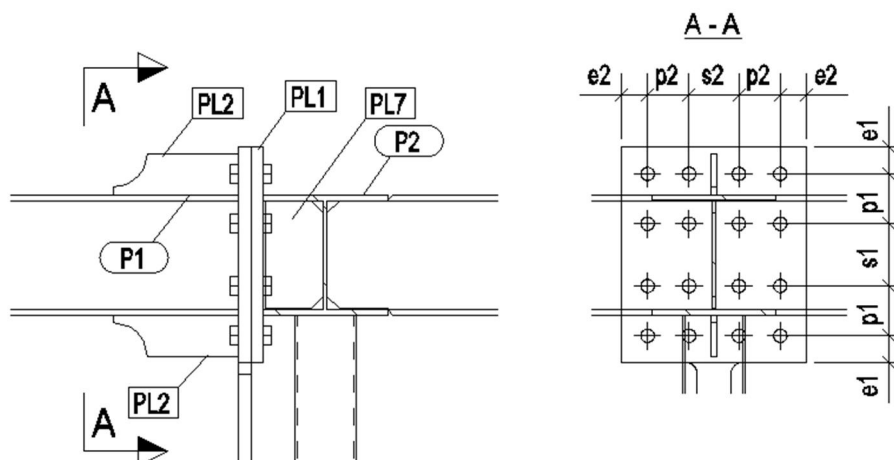
**Taulukko 2.19** Pienahitsien korrelaatiokerroin [1 taulukko 4.1]

Standardi ja teräslaji			Korrelaatiokerroin $\beta_w$
EN 10025	EN 10210	EN 10219	
S 235 S 235 W	S 235 H	S 235 H	0,8
S 275 S 275 N/NL S 275 M/ML	S 275 H S 275 NH/NLH	S 275 H S 275 NH/NLH S 275 MH/MLH	0,85
S 355 S 355 N/NL S 355 M/ML S 355 W	S 355 H S 355 NH/NLH	S 355 H S 355 NH/NLH S 355 MH/MLH	0,9
S 420 N/NL S 420 M/ML		S 420 MH/MLH	1,0
S 460 N/NL S 460 M/ML S 460 Q/QL/QL1	S 460 NH/NLH	S 460 NH/NLH S 460 MH/MLH	1,0

## 2.5 Liitoksen geometrinen parametrisointi

Liitoksen geometrisellä parametrisoinnilla tarkoitetaan tässä yhteydessä laskentaohjelman automatisointia liitoksen geometrialle. Geometriset rajoitukset esimerkiksi ruuvien väliselle etäisyydelle tulevat monista lähteistä. Ruuvien etäisyyksiä ohjaa mitoitusohjaavan normiston asettamat minimi- ja joskus myös maksimietäisyydet. Käytännön asennustyö asettaa rajoituksia ruuvien asentamiselle ja niiden kiristämiseksi. Ruuvien minimietäisyydet liitettävän levyn reunaan ja toisiinsa nähden on esitetty teräsrakentamisen liitossuunnittelua ohjaavan EN1993-1-8 taulukossa 3.3, josta on rajallinen otos tämän työn taulukossa 2.13. Käytännön asentamisessa, ruuvi täytyy olla asennettavissa ja kiristettävissä. Normaalisti liitosta mitoittava ja mallintava henkilö ottaa nämä huomioon asettamalla etäisyydet manuaalisesti. Tämän diplomityön tuotoksena tehdyn laskentatyökalun yhtenä tavoitteena on käyttäjäystävällisyys. Mikäli pakollinen geometrian asettelu saadaan minimoitua, laskentatyökalun käytöstä tulee nopeampaa ja vaivattomampaa.

Parametrisesta laskennasta esimerkkinä on kuvan 2.14 mitta  $s_2$ .

**Kuva 2.15** Esimerkki parametrisesta laskennasta leikkauspalaliitoksessa

Mitan  $s_2$  on oltava vähintään yhtä suuri kuin pulttien keskiövälien minimietäisyys  $p_1$  ja ruuvit on mahdollista kiristämään PL2 levystä ja sen hitseistä huolimatta. PL2 levyn paksuus on käyttäjän valitsema ja hitsien tarvitsema tila on levyn paksuudesta riippuvaisia. Tähän yhdistettynä ruuvien kiristämiseen tarvittava tila, saadaan matkan  $s_2$  parametrinen kaava 5.1.

$$s_2 \geq \max \begin{cases} p_1 = 2,5d_0 \\ t_{PL2} + 2z + 2F = t_{PL2} + 2\sqrt{2}a + 2F = t_{PL2}(2,4\sqrt{2} + 1) + 2F \end{cases} \quad (5.1)$$

missä

$p_1$	Pulttien keskietäisyyksien minimiarvo taulukon 2.13 mukaan.
$d_0$	Reiän koko, mikä on ruuvien koosta riippuva (vrt. taulukko 2.11)
$t_{PL2}$	Levyn PL2 paksuus (t)
$z$	Hitsin z-mitta, joka on sama kuin hitsin a-mitta kertaa $\sqrt{2}$
	Levyn molempien puolien a-mittojen summa on $1,2 \cdot \text{levyn paksuus}$
$F$	Ruuvien kiristämiseen tarvittava tila



### 3. LIITOKSEN KUSTANNUSLASKENTA

#### 3.1 Kustannuslaskennan teoria

Tässä diplomityössä käytettäväksi kustannuslaskennan menetelmäksi valittiin Jaakko Haapion väitöskirjassa esitelty menetelmä [4]. Menetelmässä keskitytään kuuteen kustannuskomponenttiin: Työ, materiaali, investoinnit (laitteisto ja työtila), kulutettavat materiaalit, energia ja ylläpito (laitteiston ja työtilan). Kustannukset jakautuvat kahteen kategoriaan, aikariippuvaisiin ja ajasta riippumattomiin. Aikariippuvaisiin kustannuksiin luetaan työ, investointi, energia, huolto, ja jotkin kuluvat materiaalit. Ajasta riippumattomiin kustannuksiin kuuluvat materiaali ja jotkin työvaiheissa kuluvat materiaalit. Kustannuslaskenta jaetaan yksiköihin kuten materiaali, työvaihe, kuljetus ja asennus. Kokonaisuudessa osan kustannukset materiaaleista asennukseen on esitetty kaavassa 3.1 [4 kaava 3].

$$C_T = C_{SM} + C_B + C_{Cu} + C_{BW} + C_S + C_D + C_{Co} + C_{PF} + C_{PA} + C_{PT} + C_P + C_T + C_E \quad (3.1)$$

missä

$C_T$	Kokonaiskustannukset [ €]
$C_{SM}$	Materiaalin kustannukset [ €]
$C_B$	Suihkupuhdistuksen kustannukset [ €]
$C_{Cu}$	Levyn leikkaamisen kustannukset [ €]
$C_{BW}$	Profiilin hitsauksen kustannukset [ €]
$C_S$	Profiilin sahauksen kustannukset [ €]
$C_D$	Porauksen kustannukset [ €]
$C_{Co}$	Loveuksen kustannukset [ €]
$C_{PF}$	Osien valmistuskustannukset [ €]
$C_{PA}$	Osien kiinnityskustannukset [ €]
$C_{PT}$	Jälkikäsitteilyn kustannukset [ €]
$C_P$	Maalauslaskennat [ €]
$C_T$	Kuljetuskustannukset [ €]
$C_E$	Asennuskustannukset [ €]

### 3.2 Materiaali

Materiaalin kustannuksissa otetaan huomioon osan massan, materiaalin, paksuuden ja lukumäärän vaikutukset sekä laadun varmistuksen osuus. Materiaalin kustannukset on esitetty kaavassa 3.2 [4 kaava 5].

$$C_{SM} = W_{SMPI} * (C_{SMBP} + C_{SMG} + C_{SMT} + C_{SMQ} + C_{SMQT} + C_{SMUT}) \quad (3.2)$$

missä

$W_{SMPI}$	Levyn paino [ kg ]
$C_{SMBP}$	Materialin perusyksikkö hinta [ €/ kg ]
$C_{SMG}$	Teräslaadun hintakerroin [ €/ kg ]
$C_{SMT}$	Paksuuden lisähintaan [ €/ kg ]
$C_{SMQ}$	Lukumäärän lisähintaan [ €/ kg ]
$C_{SMQT}$	Lukumäärän ja paksuuden vaikutus [ €/ kg ]
$C_{SMUT}$	Levyn tarkastuksen vaikutus hintaan [ €/ kg ]

### 3.3 Työvaihe

Työvaiheisiin lasketaan kaikki konepajalla suoritettavat työvaiheet kuten levyjen sahaus, hitsaukset, poraukset yms. Konepajan työvaiheiden kustannusten laskenta on esitetty kaavassa 3.3 [4, kaava 4]

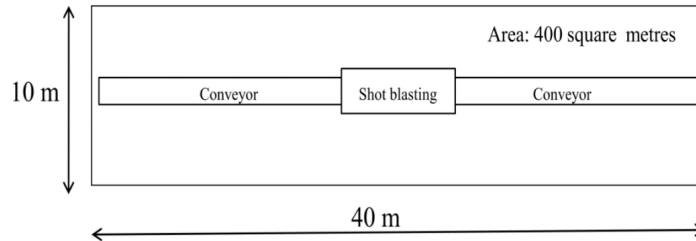
$$C_k = (T_{Nk} + T_{Pk}) * (C_{Lk} + C_{Eqk} + C_{Mk} + C_{REk} + C_{Sek}) / u_k + T_{Pk} * (C_{Ck} + C_{Enk}) + C_{Ck} \quad (3.3)$$

missä

$C_k$	Työvaiheen (k) kokonaiskustannus [ € ]
$T_{Nk}$	Tuottamaton aika työvaiheessa (k) [ min ]
$T_{Pk}$	Tuottava aika työvaiheessa (k) [ min ]
$C_{Lk}$	Yksikön työkustannus työvaiheessa (k) [ €/min ]
$C_{Eqk}$	Käytetyn laitteiston hankintahinta työvaiheessa (k) [ €/min ]
$C_{Mk}$	Käytetyn laitteiston ylläpitokustannukset työvaiheessa (k) [ €/min ]
$C_{REk}$	Työtilan hankintahinta työvaiheessa (k) [ €/min ]
$C_{Sek}$	Työtilan ylläpitokustannukset työvaiheessa (k) [ €/min ]
$C_{Ck}$	Työssä kuluneiden materiaalien kustannus työvaiheessa(k) [ €/min ]
$C_{Enk}$	Työn kuluttaman energian kustannukset työvaiheessa (k) [ €/min ]
$C_{Ck}$	Ajasta riippumattomien materiaalien kulu työvaiheessa (k) [ € ]
$u_k$	Työvaiheen (k) hyötyaste [ ≤ 1 ]

### 3.3.1 Suihkupuhdistus

Suihkupuhdistuksessa käsittelemätön rauta puhdistetaan ruosteesta, suoja öljystä ja valsihilseestä. Puhdistus suoritetaan EN ISO 8501 vaatimusten mukaisesti [15]. Osa nostetaan kuljettimelle joka kuljettaa osan hallitusti vakionopeudella suihkupuhallinyksikön läpi. Kuvassa 3.1 on esitetty suihkupuhdistuksen työalue [4, kuva 9]. Suihkupuhdistuksessa käytetään yleisesti pieniä metallirakeita. Suihkupuhdistuksen kustannukset on esitetty kaavassa 3.4 [4 kaava 8].



**Kuva 3.1** Suihkupuhdistuksen työtila

$$C_B = T_{PB} * (C_{LB} + C_{EqB} + C_{MB} + C_{REB} + C_{SeB} + C_{CB} + C_{EnB}) / u_B \quad (3.4)$$

missä

$C_B$	Suihkupuhalluksen kokonaiskustannus [ € ]
$T_{PB}$	Tuottava aika suihkupuhalluksessa [ min ]
$C_{LB}$	Yksikön työkustannus suihkupuhalluksessa (yksi työntekijä) [ €/min ]
$C_{EqB}$	Käytetyn laitteiston hankintahinta [ €/min ]
$C_{MB}$	Käytetyn laitteiston ylläpitokustannukset [ €/min ]
$C_{REB}$	Suihkupuhalluksen työtilan hankintahinta [ €/min ]
$C_{SeB}$	Työtilan ylläpitokustannukset [ €/min ]
$C_{CB}$	Työssä kuluneiden materiaalien kustannus [ €/min ]
$C_{EnB}$	Työn kuluttaman energian kustannukset [ €/min ]
$C_{CB}$	Ajasta riippumattomien materiaalien kulu [ €/min ]
$u_B$	Työvaiheen hyötyste ( 1 )

Tuottava aika  $T_{PB}$  saadaan määriteltä jakamalla osan pituus  $L_B$  [mm] kuljettimen nopeudella  $v_c$  [mm/min]. Tämä kaava (3.5) olettaa vain yksittäisen osan kulkevan puhdistukseen kerrallaan. Todellisuudessa kuljettimen leveys on yli 3 metriä, ja 3 metriä leveästä levystä saadaan leikattua useampi osa. Tämä tarkoittaa, että useampi osa voidaan puhdistaa samanaikaisesti yhden osan kustannuksella. Tässä työssä tämä osuus on yksinkertaistettu olettaen keskimäärin kolme osaa mahtuvat samanaikaiseen puhdistukseen. Tästä syystä yhtälö 3.5 saa lähdemateriaalista poikkeavasti muodon 3.6. Kuljettimen nopeudeksi on valittu lähdemateriaalin mukaisesti  $v_c = 3000$  mm/min [4].

$$T_{PB} = L_B / v_c \text{ [min]} \quad (3.5)$$

$$T_{PB} = L_B / 3 * v_c \text{ [min]} \quad (3.6)$$

Suihkupuhdistuksen työntekijäkustannukset  $c_{LB}$  koostuvat yhdestä työntekijästä, jonka tuntipalkaksi on oletettu 27,68 €/tunti eli 0,46 €/min.

$c_{EqB}$  on suihkupuhdistuslaitteiston ja kuljettimen investointikustannukset jaettuna sen oletetulle käyttöiälle 20 vuotta, huomioiden investointiasteeksi 5 %, alkukustannukseksi 200 000 € ja jälleen myyntiarvoksi 0 €. Näistä koostuu laitteiston investoinnille vuositasolla kustannukseksi 16 050 € ja siten  $c_{EqB} = 0,13$  €/min. [4].

$c_{MB}$  on laitteiston huoltokustannuksia, jotka tässä on lähdekirjallisuuden mukaisesti oletettu olevan 1000 €/vuosi eli  $c_{MB} = 0,01$ /min. [4].

$c_{REB}$  on työvaiheeseen tarvittavan tilan investointikustannukset. Kustannuksiksi on oletettu  $400 \text{ m}^2 \times 912 \text{ €/m}^2 = 364\,800 \text{ €}$ . Tilan jälleenmyyntiarvoksi on arvioitu  $400 \text{ m}^2 \times 12 \text{ €/m}^2 = 4\,800 \text{ €}$ . Tilan käyttöajaksi on oletettu 50 vuotta ja investointiasteeksi on laitettu 5%. Tästä saadaan tilan investointikustannuksiksi 19 720 €/vuosi eli  $c_{REB} = 0,16$  €/min. [4].

$c_{SeB}$  on työtilan huoltokulut  $400 \text{ m}^2 \times 72 \text{ €/m}^2$ , mistä seuraa 28 800 €/vuosi eli 0,24 €/min. [4].

$c_{CB}$  on suihkupuhalluksessa kuluvien materiaalien kustannukset. Tässä laskennassa suihkupuhdistuksessa käytetään teräsrakeita, ja kun oletetaan laitteiston käyttöasteeksi 0,5, niiden tyypillinen kulutus on 10 kg/8 tuntia. Tästä seuraa 0,042 kg/min kun käyttöaste on 1. Materiaalin yksikköhinnaksi on oletettu 0,50 €/kg ja tästä saadaan kuluvien materiaalien kustannukseksi  $c_{CB}$  0,02 €/min. [4].

$c_{EnB}$  on suihkupuhdistuksessa käytetyn energian kustannus. Puhalluksessa on oletettu neljän 10 kW puhallusturbiinin laitteisto. Energiakustannus on 0,1 €/kWh eli  $c_{EnB} = 0,07$  €/min. [4].

Suihkupuhalluksen kokonaiskustannukseksi saadaan siis kaava (3.7).

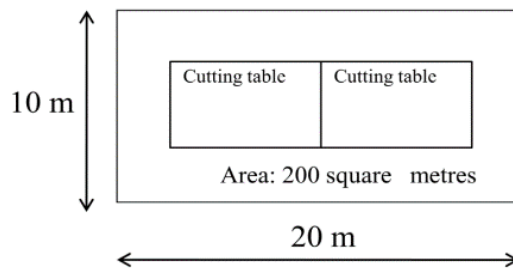
$$C_B = L_B / (3 \cdot v_c) \cdot (0,46 + 0,13 + 0,01 + 0,16 + 0,24 + 0,02 + 0,07) / 1 \quad (3.7)$$

$$C_B = L_B \cdot 0,000131 \text{ [€/min]} \quad (3.7)$$

### 3.3.2 Levyn leikkaus

Leikkaus asemalla, levy asetetaan leikkuutasolle. Leikkauksen operaattori ohjaa leikkauksen tekevää vaunua. Leikkauksessa käytetään enimmillään 30 mm levyille plasmaleikkuria. Yli 30 mm levyt leikataan polttoleikkaamalla. Leikkaustyön jälkeen toinen työpisteen työntekijä poistaa leikkausjätteet levystä. Leikkaaminen tulee suorittaa SFS EN 1090-2 toleranssien vaatimalle tasolle [2]. Kuvassa 3.2 on esitetty leikkauksen työpiste

[4, kuva 11]. Leikkauksen kustannukset on esitetty kaavassa 3.8 [4 kaava 11]. Työvaiheessa tuottamaton aika on 2 minuuttia valmisteluja, 0,5 minuuttia leikkauspään liikkuttaminen aloituspisteelle ja pois sekä 0,5 minuuttia leikkauspään sytyttämiseen sekä lämpiämiseen. Leikkausjäänteiden poisto ei vie ollenkaan aikaa, koska se suoritetaan leikkauksen kanssa samanaikaisesti. Näin ollen  $T_{NCu} = 3\text{min}$ . [4, 4.5.3]. Varsinainen leikkauksenopeus  $T_{PCu}$  on esitetty kaavassa 3.9 plasmaleikkaukselle ja kaavassa 3.10 polttoleikkaukselle. [4 kaavat 13 ja 14]. Kuvassa 3.3 [4 kuva 12] on esitetyt leikkauksenopeuksien kaavat plasmaleikkaukselle ja polttoleikkaukselle sekä niiden käyrät ajan ja levyn paksuuden suhteen [4].

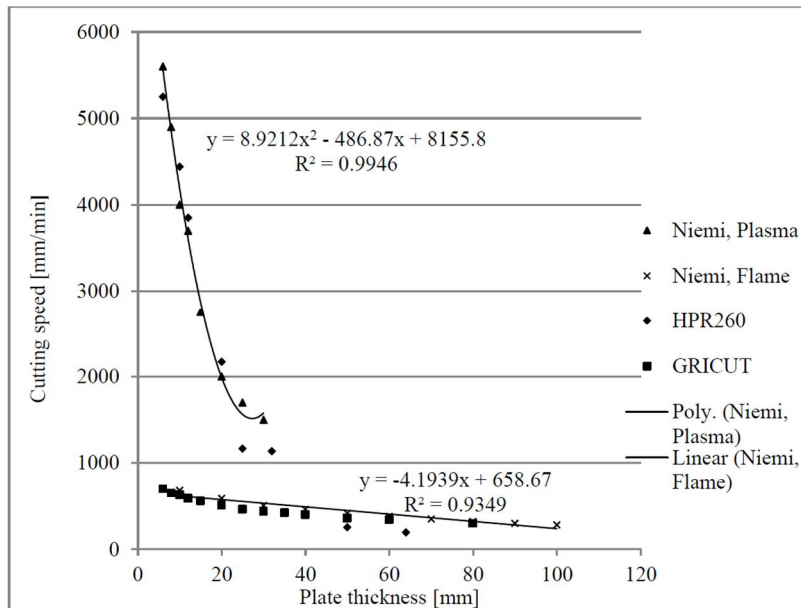


**Kuva 3.2** Leikkauksen työpiste

$$C_{Cu} = (T_{NCu} + T_{PCu}) * (c_{LCu} + c_{EqCu} + c_{MCu} + c_{RECu} + c_{SeCu} + c_{CCu} + c_{EnCu}) / u_{Cu} + T_{PCu} * (c_{CCu} + c_{EnCu}) \quad (3.8)$$

missä

$C_{Cu}$	Työvaiheen kokonaiskustannus [ € ]
$T_{NCu}$	Tuottamaton aika työvaiheessa (k) [ min ]
$T_{PCu}$	Leikkauksaika [ min ]
$c_{LCu}$	Yksikön työkustannus (kaksi työntekijää) [ €/min ]
$c_{EqCu}$	Käytetyn laitteiston hankintahinta [ €/min ]
$c_{MCu}$	Käytetyn laitteiston ylläpitokustannukset [ €/min ]
$c_{RECu}$	Työvaiheen työtilan hankintahinta [ €/min ]
$c_{SeCu}$	Työtilan ylläpitokustannukset [ €/min ]
$c_{CCu}$	Työssä kuluneiden materiaalien kustannus [ €/min ]
$c_{EnCu}$	Työn kuluttaman energian kustannukset [ €/min ]
$c_{CCu}$	Ajasta riippumattomien materiaalien kulu [ €/min ]
$u_{Cu}$	Työvaiheen hyötyste ( 1 )



**Kuva 3.3** Leikkausnopeudet  $v_{Cu}$  [mm/min] riippuen levyn paksuudesta [mm]

$$T_{PCu} = L_{Cu} / (8,9212 * t^2 - 486,87 * t + 8155,8) \quad \text{Plasmaleikkaus} \quad (3.9)$$

$$T_{PCu} = L_{Cu} / (-4,1939 * t + 658,67) \quad \text{Polttoleikkaus} \quad (3.10)$$

Leikkauksen työntekijäkustannukset  $c_{LCu}$  koostuvat kahdesta työntekijästä. Toinen toimii leikkauslaitteiston operaattorina ja toinen hoitaa materiaalin käsittelyä. Työntekijöiden tuntipalkaksi on oletettu 27,68 €/tunti eli 0,92 €/min.

$c_{EqCu}$  on leikkauslaitteiston investointikustannus jaettuna sen oletetulle käyttöiälle (20v), huomioiden investointi asteeksi 5 %, alkukustannukseksi 280 000 € ja jälleen myyntiarvoksi 0 €. Näistä koostuu laitteiston investoinnille vuositasolla kustannukseksi 22 468 € ja siten  $c_{EqCu} = 0,19$  €/min. [4].

$c_{MCu}$  on laitteiston huoltokustannuksia, jotka tässä on lähdekirjallisuuden mukaisesti oletettu olevan 1000 €/vuosi eli  $c_{MCu} = 0,01$ /min. [4].

$c_{RECu}$  on työvaiheeseen tarvittavan tilan investointi kustannukset. Kustannuksiksi on oletettu  $200 \text{ m}^2 \times 912 \text{ €/m}^2 = 182\,400 \text{ €}$  Tilan jälleenmyyntiarvoksi on arvioitu  $200 \text{ m}^2 \times 12 \text{ €/m}^2 = 2\,400 \text{ €}$  Tilan käyttöajaksi on oletettu 50 vuotta ja investointi asteeksi on laitettu 5%. Tästä saadaan tilan investointikustannuksiksi 9 860 €/vuosi eli  $c_{RECu} = 0,08$  €/min. [4].

$c_{SeCu}$  on työtilan huoltokulut  $200 \text{ m}^2 \times 72 \text{ €/m}^2$ , mistä seuraa 14 400 €/vuosi eli 0,12 €/min. [4].

$c_{CCu}$  on leikkauksessa kuluvien materiaalien kustannukset. Kuluvat materiaalit riippuvat käytetystä leikkaus tavasta. Enimmillään 30 mm paksuisen levyn leikkauksessa käytetään plasmaleikkausta.

Polttoleikkauksessa kuluvia materiaaleja ovat propaani, happi ja suuttimet. Tässä laskennassa on suuttimeksi oletettu GRICUT 1230-PM/2280-PMY (0,2 bar), jolla propaanin kulutus on  $0,0063 \text{ m}^3/\text{min}$ . Propaanin hinta on  $18,40 \text{ €/m}^3$  eli propaanin kustannus on  $0,1 \text{ €/min}$ . Hapenkulutus valitulla suuttimella on  $0,025 \text{ m}^3/\text{min}$  ja hapen kustannus on  $4,18 \text{ €/m}^3$  eli hapen kustannus on  $0,1 \text{ €/min}$ . Suuttimien hinta on alhainen muihin kustannuksiin verrattuna ja suuttimien käyttöikä pystytään jatkamaan huollolla, joten niiden aiheuttama kustannus on jätetty pois näistä laskelmista. Leikkauksessa käytetyn hapen määrä muuttuu leikattavan levyn paksuuden funktiona. Tämä on esitetty kaavassa 3.11 [4].

$$c_{CCu} = 0,12 + 0,1 + (1E - 05 * t^2 + 0,001 * t + 0,0224) * 4,18 \text{ [€/min]} \quad (3.11)$$

missä  $t$  on leikattavan levyn paksuus [mm]

Plasmaleikkauksessa kuluvia materiaaleja ovat paineistettu ilma suojakaasuna, happi plasmakaasuksi, plasmaleikkurin suuttimet sekä elektrodit. Tässä laskennassa ei huomioida paineistetun aiheuttamaa kustannusta. Hapen kulutus on  $4,25 \text{ m}^3/\text{h}$  (HyPerformance Plasma HPR260) eli  $0,071 \text{ m}^3/\text{min}$ . Hapen kustannus on  $0,3 \text{ €/min}$ .

Suuttimien ja elektrodien kustannukseksi on arvioitu  $40 \text{ €}$  niiden käyttöikä ja niiden oletetaan kestävän yhden vuoron (480 minuuttia) eli näiden osien kustannukset ovat  $0,08 \text{ €/min}$ . [4].

$c_{CCu}$  plasmaleikkauksessa on  $0,38 \text{ €/min}$ .

$c_{EnCu}$  on plasmaleikkauksessa käytetyn energian kustannus. Tyypillisesti energian kulutus on  $n 200$  ampeeria joka kerrotaan  $360$  voltin jännitteellä antaa tehoksi  $72 \text{ kW}$ . Energiakustannus on  $0,1 \text{ €/kWh}$  eli  $c_{EnCu} = 0,12 \text{ €/min}$ . Polttoleikkauksessa ei kulu energiaa [4].

$u_C$  on leikkauksen käyttöaste, mikä on asetettu arvoon  $1$ .

Polttoleikkauksen kokonaiskustannukseksi saadaan siis kaava (3.12).

$$C_{Cu} = (3 + L_{Cu}/(-4,1939 * t + 658,67)) * (0,92 + 0,19 + 0,01 + 0,08 + 0,12)/1 + L_{Cu}/(-4,1939 * t + 658,67) * (0,22 + (1E - 05 * t^2 + 0,001 * 1 + 0,0224) * 4,18)$$

→

$$C_{Cu} = (3 + L_{Cu}/(-4,1939 * t + 658,67)) * 1,32 + L_{Cu}/(-4,1939 * t + 658,67) * (0,22 + (4,18 * 10^{-5} * t^2 + 4,18 * 10^{-3} * t + 0,094)) \text{ [€]} \quad (3.12)$$

Plasmaleikkauksen kokonaiskustannukseksi saadaan siis kaava (3.13).

$$C_{Cu} = ( 3 + L_{Cu} / ( 8,9212 * t^2 - 486,87 * t + 8155,8 ) ) * ( 0,92 + 0,19 + 0,01 + 0,08 + 0,12 ) / 1 + L_{Cu} / ( 8,9212 * t^2 - 486,87 * t + 8155,8 ) * ( 0,38 + 0,12 ) \quad (3.13)$$

→

$$C_{Cu} = 3,96 + L_{Cu} / ( 6,76 * t^2 - 368,84 * t + 6178,64 ) + L_{Cu} / ( 17,84 * t^2 - 973,74 * t + 16311,60 ) \quad (3.13)$$

### 3.3.3 Profiilin hitsaus

Profiilin hitsauksella tarkoitetaan levyistä hitsatun profiilin valmistusta. Tässä työssä käytetään lähdekirjan [4] mukaisia lähtöolettamuksia profiilin hitsaukseen. Hitsaus suoritetaan jauhekaarihitsauksena ja hitsauslaitteisto on varustettu kahdella hitsauspäällä. Tämä mahdollistaa kahden palkin samanaikaisen hitsaamisen. Jauhekaarihitsauksen alkaessa, levy osat ovat pistehitsattuja pöydällä paikoilleen ja jauhekaarihitsauslaitteiston päät ovat aseteltu paikoilleen. Saumaan on syötetty hitsauksessa suojaukseen tarvittavaa jauhetta ja hitsauslangan syttyessä, hitsaus alkaa. Sauman koosta riippuen, sauma hitsataan useaan kertaan. Useamman hitsaus kerran tapauksessa, hitsauspää hitsaa sauman päähän ja palatessaan takaisin. Kuvassa 3.4 on esitetty hitsaukseen käytetty työpiste. Kaavassa 3.14 on esitetty profiilin hitsauksen kokonaiskustannukset [4].

$$C_{BW} = (T_{NBW} + T_{PBW}) * (C_{LBW} + C_{EqBW} + C_{MBW} + C_{REBW} + C_{SeBW}) / u_{BW} + T_{PBW} * (C_{CBW} + C_{EnBW}) \quad (3.14)$$

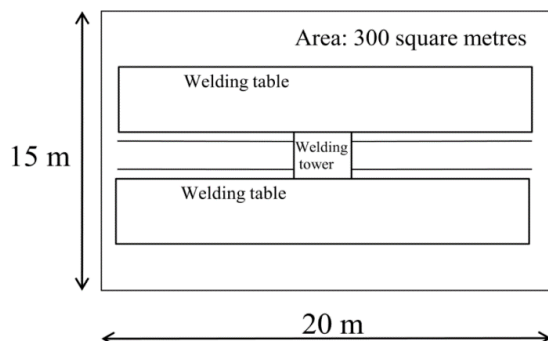
missä

$C_{BW}$	Työvaiheen kokonaiskustannus [ € ]
$T_{NBW}$	Tuottamaton aika työvaiheessa [ min ]
$T_{PBW}$	Hitsausaika [ min ]
$C_{LBW}$	Yksikön työkustannus (kaksi työntekijää) [ €/min ]
$C_{EqBW}$	Käytetyn laitteiston hankintahinta [ €/min ]
$C_{MBW}$	Käytetyn laitteiston ylläpitokustannukset [ €/min ]
$C_{REBW}$	Työvaiheen työtilan hankintahinta [ €/min ]
$C_{SeBW}$	Työtilan ylläpitokustannukset [ €/min ]
$C_{CBW}$	Työssä kuluneiden materiaalien kustannus [ €/min ]
$C_{EnBW}$	Työn kuluttaman energian kustannukset [ €/min ]
$u_{BW}$	Työvaiheen hyötyste ( 1 )

Tuottamattomasta ajasta ( $T_{NBW}$ ) 2 minuuttia on hitsauslaitteiston parametrien asettamista. Hitsaustorni liikkuu 5 metriä /minuutti. Tästä on arvioitu tuottamattomaksi ajaksi 2+2 minuuttia tornin tuottamattomasta kulkemisesta lähdöstä paluuseen. Hitsauksen syttymiseen kuluu 0,25 minuuttia. Hitsauksesta aiheutuvien jäänteiden poistoa tehdään hitsauksen kanssa samanaikaisesti, kun toista palkkia hitsataan toisella pöydällä. Lopulliseksi tuottamattomaksi ajaksi saadaan  $T_{NBW} = 6,25$  minuuttia [4].



$T_{PBW}$  edustaa hitsauksessa tuottavaa aikaa. Hitsauksen tuottavuuteen vaikuttaa moni asia, kuten hitsauslangan paksuus, hitsauksen virrankulutus jne. Tässä kustannuslaskennassa käytetään Haapion kirjan mukaisia hitsausnopeuksia jotka ovat esitetty kaavoissa 3.15, 3.16, ja 3.17.



**Kuva 3.4** Profiilin hitsauksen työpiste

Hitsaustyyleille yhteinen hitsausmassan tuottonopeus on  $8.34 \text{ kg/h} = 0,14 \text{ kg/min}$ . [4].

Pienahitsauksen massa:

$$W_w = L_w * a^2 * 7,85 * 10^{-6} [kg] \quad (3.15)$$

missä

- $W_w$  Hitsin massa [kg]
- $L_w$  Hitsin pituus [mm]
- $a$  Piena hitsin a mitta [mm]

Puoli V hitsauksen massa:

$$W_w = L_w * (b^2 * \tan \alpha) / 2 * 7,85 * 10^{-6} [kg] \quad (3.16)$$

missä

- $W_w$  Hitsin massa [kg]
- $L_w$  Hitsin pituus [mm]
- $b$  Hitsin syvyys mitta [mm]
- $\alpha$  Viistettyjen reunojen välinen kulma [°]

Täysi V hitsauksen massa:

$$W_w = L_w * b^2 * \tan(\alpha/2) * 7,85 * 10^{-6} [kg] \quad (3.17)$$

missä

- $W_w$  Hitsin massa [kg]
- $L_w$  Hitsin pituus [mm]
- $b$  Hitsin syvyys mitta [mm]
- $\alpha$  Viistettyjen reunojen välinen kulma [°]

Profiilin hitsauksen työntekijäkustannukset  $c_{LBW}$  koostuvat kahdesta työntekijästä. Toinen on hitsausaseman operaattori ja toinen käsittelee materiaaleja sekä asettelee osat hitsattavalle paikalleen. Työntekijän tuntipalkaksi on oletettu 27,68 €/tunti eli 0,92 €/min.

$c_{EqBW}$  on hitsauslaitteiston investointikustannukset. Laitteistoon kuuluu varsinainen hitsausasema sekä kaksi hitsauspöytää. Hitsausasemassa on kaksi hitsauspäättä. Laitteiston investointi kustannukset jaetaan sen oletetulla käyttöiällä (20v), huomioiden investointiasteeksi 5 %, alkukustannukseksi 200 000 € ja jälleen myyntiarvoksi 0 €. Näistä koostuu laitteiston investoinnille vuositason kustannukseksi 16 049 € ja siten  $c_{EqBW} = 0,13$  €/min. [4].

$c_{MBW}$  on laitteiston huoltokustannuksia, jotka tässä on lähdekirjallisuuden mukaisesti oletettu olevan 1000 €/vuosi eli  $c_{MBW} = 0,01$ /min. [4].

$c_{REBW}$  on työvaiheeseen tarvittavan tilan investointikustannukset. Kustannuksiksi on oletettu  $300 \text{ m}^2 \times 912 \text{ €/m}^2 = 273\,600 \text{ €}$ . Tilan jälleenmyyntiarvoksi on arvioitu  $300 \text{ m}^2 \times 12 \text{ €/m}^2 = 3\,600 \text{ €}$ . Tilan käyttöajaksi on oletettu 50 vuotta ja investointiasteeksi on laitettu 5%. Tästä saadaan tilan investointikustannuksiksi 14 790 €/vuosi eli  $c_{REBW} = 0,12$  €/min. [4].

$c_{SeBW}$  on työtilanhuoltokulut  $300 \text{ m}^2 \times 72 \text{ €/m}^2$ , mistä seuraa 21 600 €/vuosi eli 0,18 €/min. [4].

$c_{CBW}$  on profiilin hitsauksessa kuluvien materiaalien kustannukset. Hitsauksessa kuluvia materiaaleja on hitsauslanka ja hitsausta suojaava aine. Langan ja suoja-aineen kulu on sama eli 1 kg lankaa kuluttaa myös 1 kg suoja-ainetta. Langan hinta on 1,91 €/kg ja kuluukseksi on oletettu 0,14 kg/min. Suoja-aineen kustannus on 3 €/kg. Tästä seuraa kustannukseksi 0,68 €/min per hitsaussuutin [4].

$c_{EnBW}$  on jauhekaarihitsauksessa käytetyn energian kustannus. Oletettu energian kulutus jauhekaarihitsauksessa 5 mm umpilangalla on 800 ampeeria joka kerrottuna 30 voltilla antaa tehoksi 24 kW/hitsauspää. Energian hinta on 0,1 €/kWh eli yksi hitsauspää kuluttaa  $c_{EnBW} = 0,04$  €/min. Muiden osien kuluttamat energiat ovat merkityksettömiä verrattuna hitsauksen kuluttamaan energiaan, joten niitä ei huomioida tässä laskennassa [4].

$u_{BW}$  on hitsauksen käyttöaste, mikä on asetettu arvoon 1.

Profiilin hitsauksen kokonaiskustannukseksi saadaan kaava (3.18).

$$C_{BW} = (6,25 + L_w \cdot a^2 \cdot 7,85 \cdot 10^{-6} / 0,14) \cdot (0,92 + 0,13 + 0,01 + 0,12 + 0,18) / 1 + (L_w \cdot a^2 \cdot 7,85 \cdot 10^{-6} / 0,14) \cdot n_{wh} \cdot (0,68 + 0,04) \quad (3.18)$$

$$C_{BW} = (76,26 + n_{wh} \cdot 40,37) \cdot L_w \cdot a^2 \cdot 10^{-6} + 8,5 \quad [€] \quad (3.18)$$

missä  $n_{wh}$  on yhdenaikaisten hitsauksien lukumäärä (1 tai 2)

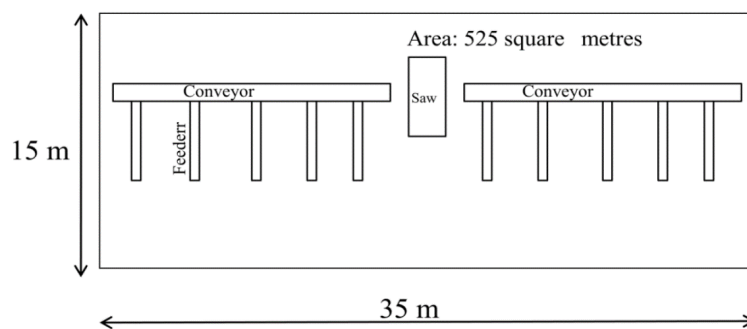
Vastaavasti hitsauksien tyypistä riippuen saadaan pienahitsille kaava 3.19 ja V hitsille kaava 3.20.

$$C_{BW} = (38,13 + n_{wh} * 20,19) L_w * b^2 * \tan\alpha * 10^{-6} + 8,5 \text{ [ €]} \quad (3.19)$$

$$C_{BW} = (76,26 + n_{wh} * 40,37) L_w * b^2 * \tan(\alpha/2) * 10^{-6} + 8,5 \text{ [ €]} \quad (3.20)$$

### 3.3.4 Sahaus

Tässä laskennassa käytetään profiilin sahauksessa vannesahaa. Prosessi alkaa leikattavan profiilin kiinnittämisestä paikoilleen. Mikäli profiilin pää halutaan leikata viistoon, sahan kulmaa täytyy muuttaa. Kun sahaus on tehty, saha pysähtyy ja se nostetaan takaisin pystyasentoon. Leikattava profiili vapautetaan ja kuljetin vie sen uuteen paikkaan profiilin toisen päään leikkausta varten. Profiili kiinnitetään ja leikkaus jatkuu kuin aikaisemmin. Sahauksen työpaikka on esitetty kuvassa 3.5 [4 kuva 21]. Sahauksen kustannusten arviointi on esitetty kaavassa 3.21 [4].



**Kuva 3.5** Sahauksen työpaikka

$$C_S = (T_{NS} + T_{PS}) * (c_{LS} + c_{EqS} + c_{MS} + c_{RES} + c_{SeS}) / u_S + T_{PS} * (c_{CS} + c_{EnS}) \quad (3.21)$$

missä

$C_S$	Työvaiheen kokonaiskustannus [ € ]
$T_{NS}$	Tuottamaton aika (vrt. kaava 3.22) [ min ]
$T_{PS}$	Sahauksen aika työvaiheessa [ min ]
$c_{LS}$	Yksikön työkustannus (kaksi työntekijää) [ €/min ]
$c_{EqS}$	Käytetyn laitteiston hankintahinta [ €/min ]
$c_{MS}$	Käytetyn laitteiston ylläpitokustannukset [ €/min ]
$c_{RES}$	Työvaiheen työtilan hankintahinta [ €/min ]
$c_{SeS}$	Työtilan ylläpitokustannukset [ €/min ]
$c_{CS}$	Työssä kuluneiden materiaalien kustannus [ €/min ]
$c_{EnS}$	Työn kuluttaman energian kustannukset [ €/min ]
$u_S$	Työvaiheen hyötöaste ( 1 )

Tuottamaton aika  $T_{NS}$  koostuu laitteiston valmisteluista, leikattavan osan kiinnittämisestä, profiilin siirtämisestä kuljettimella sahan läpi, terän nostoista ja laskemisista sekä

profiilin vapauttamisesta. Sahan valmisteluihin oletetaan kuluvan 2 minuuttia sekä sahan kääntöön kuluu 1 minuutti. Leikattavan profiilin kiinnittämiseen kuluu 0,5 minuuttia. Sahan terän laskemiseen kuluu 0,25 minuuttia ja nostamiseen 0,5 minuuttia. Kuljetinhihnan nopeus on 20 000mm/minuutti, joten profiilin kuljettamiseen kuluva aika  $T_{con} = L/20\,000$  [min]. Tuottamaton aika on esitetty kaavassa 3.22 [4].

$$T_{NS} = 4,5 + 1_{(viiste)} + 1_{(viiste)} + L/20000 [min] \quad (3.22)$$

Sahaukseen kuluvassa ajassa  $T_{PS}$  on oletettu I-profiili kyljellään eli uuma on horisontaalisesti kuljettimeen nähden. Tuottavaan aikaan vaikuttaa leikattavan profiilin materiaali, terän syöttönopeus ja profiilin koko. Tuottavalle ajalle saadaan kaavat 3.23 ja 3.24 [4].

Profiilin pystyosien leikkaukseen kuluva aika:

$$T_{PS} = h/(SxS_m) \quad [min] \quad (3.23)$$

Profiilin vaakaosien leikkaukseen kuluva aika:

$$T_{PS} = A_h/Q \quad [min] \quad (3.24)$$

missä

- h Profiilin sahattava korkeus [mm]
- S Sahan leikkausnopeus pystysuunnassa (vrt. kaava 3.25) [mm/min]
- $S_m$  Materiaalin vaikutuskerroin (vrt. taulukko 3.1)
- $A_h$  Profiilin vaakaosien yhteenlaskettu poikkipinta-ala [mm<sup>2</sup>]
- Q Terän sahaus tehokkuus (vrt. taulukko 3.2) [mm<sup>2</sup>/min]

Vannesahan syöttönopeus S

$$S = 0,0328 * t_{mv}^2 - 3,1794 * t_{mv} + 115,6 \quad [mm/min] \quad (3.25)$$

missä  $t_{mv}$  Paksuimman pystyssä olevan levyn seinämäpaksuus [mm]

**Taulukko 3.1** Materiaalin vaikutuskerroin  $S_m$

Materiaali	$S_m$
<b>S235</b>	1,00
<b>S355</b>	0,90
<b>S400</b>	0,8

**Taulukko 3.2** Terän sahauksen tehokkuus Q

<b>Materiaali</b>	<b>Q</b> [mm <sup>2</sup> /min]
<b>S235</b>	11 300
<b>S355</b>	8 800
<b>S400</b>	6 900

Sahauksessa työntekijäkustannukset  $c_{LS}$  koostuvat yhdestä työntekijästä. Työntekijän tuntipalkaksi on oletettu 27,68 €/tunti eli 0,46 €/min.

$c_{EqS}$  on sahauslaitteiston investointikustannukset. Laitteiston investointikustannukset jaetaan sen oletetulla käyttöiälle 20 vuotta, huomioiden investointi asteeksi 5 %, alkukustannukseksi 310 000 € ja jälleen myyntiarvoksi 0 €. Näistä koostuu laitteiston investoinnille vuositason kustannukseksi 24 875 € ja siten  $c_{EqS} = 0,21$  €/min. [4].

$c_{MS}$  on laitteiston huoltokustannuksia, jotka tässä on lähdekirjallisuuden mukaisesti oletettu olevan 1000 €/vuosi eli  $c_{MS} = 0,01$ /min. [4].

$c_{RES}$  on työvaiheeseen tarvittavan tilan investointikustannukset. Kustannuksiksi on oletettu  $525 \text{ m}^2 \times 912 \text{ €/m}^2 = 748\,800 \text{ €}$ . Tilan jälleenmyyntiarvoksi on arvioitu  $525 \text{ m}^2 \times 12 \text{ €/m}^2 = 6\,300 \text{ €}$ . Tilan käyttöajaksi on oletettu 50 vuotta ja investointiasteeksi on laitettu 5%. Tästä saadaan tilan investointikustannuksiksi 25 882 €/vuosi eli  $c_{RES} = 0,21$  €/min. [4].

$c_{SES}$  on työtilanhuoltokulut  $525 \text{ m}^2 \times 72 \text{ €/m}^2$ , mistä seuraa 37 800 €/vuosi eli 0,31 €/min. [4].

Sahauksen kulutettavien tarvikkeiden  $c_{CS}$  kustannukset ovat laskettavissa sahauksessa kuluihin terien kustannuksista (kaava 3.31). Terien kestävyys lasketaan kaavan 3.26 mukaan [4].

$$S_t = Q * F_s * F_{sp} \quad (3.26)$$

missä

- $S_t$  Terän sahauksen kapasiteetti ennen vaihtamista [mm<sup>2</sup>]
- $Q$  Terän sahaus tehokkuus (vrt. taulukko 3.2) [mm<sup>2</sup>/min]
- $F_s$  Käytetyn sahauslaitteiston ominainen arvo ( $F_s = 1350$ ) [4]
- $F_{sp}$  Kerroin joka riippuu sahattavasta materiaalista (vrt. kaava 3.27)

$$F_{sp} = -0,0001 * t_{mv}^2 + 0,0159 * t_{mv} + 0,3716 \quad (3.27)$$

$F_{sp}$  ja  $Q$  arvot sijoitettaessa kaavaan 3.26, saadaan kaavat 3.28, 3.29 ja 3.30 [4].

$$S_t = -1\,526 * t_{mv}^2 + 242\,555 * t_{mv} + 5\,668\,758 \text{ [mm}^2\text{]}, (\text{teräs: S235}) \quad (3.28)$$

$$S_t = -1\,188 * t_{mv}^2 + 188\,892 * t_{mv} + 4\,414\,608 \text{ [mm}^2\text{]}, (\text{teräs: S355}) \quad (3.29)$$

$$S_t = -932 * t_{mv}^2 + 148\,109 * t_{mv} + 3\,461\,454 \text{ [mm}^2\text{]}, (\text{teräs: S400}) \quad (3.30)$$

Sahauksen kulutettavien tarvikkeiden  $c_{CS}$  kustannukset lasketaan kaavalla 3:31.

$$c_{CS} = A_t / (S_t * T_{PS}) * p_{SB} \text{ [€min]} \quad (3.31)$$

missä

$A_t$  Sahattu poikkipinta-ala [mm<sup>2</sup>]

$p_{SB}$  Uuden terän hinta (tässä päivitetty hinta 150€)

$c_{EnS}$  on sahauksessa käytetyn energian kustannus. Oletettu energian kulutus on 10 kW. Energian hinta on 0,1 €/kWh eli kulutus  $c_{EnS} = 0,02$  €/min. Muiden osien kuluttamat energiat ovat merkityksettä verrattuna sahauksen kuluttamaan energiaan, joten niitä ei huomioida tässä laskennassa [4].

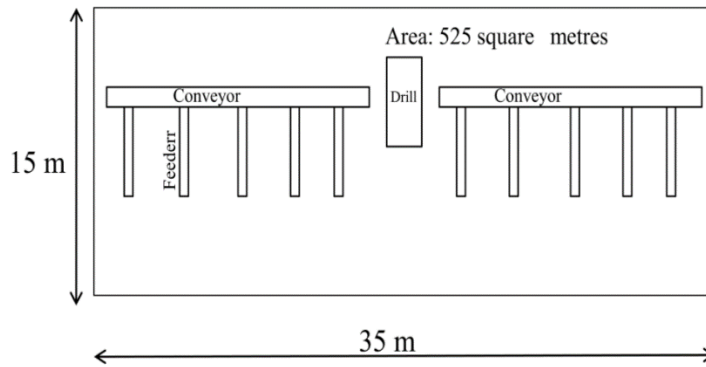
$u_s$  on sahauksen käyttöaste, mikä on asetettu arvoon 1.

Sahauksen kokonaiskustannukseksi saadaan siis kaava (3.32).

$$C_S = (4,5 + 1_{(viiste1)} + 1_{(viiste2)} + L/20000 + \sum_{i=1}^2 (h_i / (S * S_m) + A_{hi} / Q)) * (0,46 + 0,21 + 0,01 + 0,21 + 0,31) + \sum_{i=1}^2 (h_i / (S * S_m) + A_{hi} / Q) * (A_{ti} / (S_t * (h_i / (S * S_m) + A_{hi} / Q)) * 100 + 0,02) \text{ [€]} \quad (3.32)$$

### 3.3.5 Poraus

Laskennassa oletetaan Haapion väitöskirjan kaltainen tilanne, jossa automaattiporauslaitteistossa on kolme porausterää, kaksi poraa horisontaalisesti ja yksi poraa vertikaalisesti. Laitteisto voi porata kolmea reikää yhtäaikaaisesti. Prosessi alkaa kun operaattori on asettanut porauksen ohjaamiseen tarvittavat parametrit. Tämän jälkeen porattava osa on kiinnitetty telineeseen ja siirretty porauksen kannalta ensimmäisen kohtisuoran reiän/rivin poraamisen kohdalle. Pora käynnistyy ja poraa reiät. Porauksen jälkeen, poran terä poistuu reiästä. Reikä rivin tapauksessa, pora siirtyy uuteen sijaintiin ja aloittaa poraamisen jne. Tässä oletetaan, että kaikki reiät samassa rivissä ovat saman kokoisia ja mahdolliset terän vaihdot voidaan suorittaa profiilin siirtojen aikana. Jos porattavia rivejä on enemmän kuin yksi, profiili täytyy irrottaa ja siirtää uuteen paikkaan. Mikäli profiilin neljännellä sivulla (pohjalla) on porattavia reikiä, profiili täytyy irrottaa, kääntää ja kiinnittää uudestaan. Lopulta profiili irrotetaan, porausterät palaavat aloituspaikalleen, profiili liikutetaan kuljetushihnalle ja prosessi loppuu tähän. Porauksen työpiste on esitetty kuvassa 3.6 ja porauksen kokonaiskustannusten kaava on 3.33 [4].



**Kuva 3.6** Porauksen työpiste

$$C_D = (T_{ND} + T_{PD}) * (c_{LD} + c_{EqD} + c_{MD} + c_{RED} + c_{SeD}) / u_D + T_{PD} * (c_{CD} + c_{EnD}) \quad (3.33)$$

missä

$C_D$	Työvaiheen kokonaiskustannus [ € ]
$T_{ND}$	Tuottamaton aika (vrt. kaava 3.34) [ min ]
$T_{PD}$	Porauksen aika työvaiheessa [ min ]
$c_{LD}$	Yksikön työkustannus (yksi työntekijä) [ €/min ]
$c_{EqD}$	Käytetyn laitteiston hankintahinta [ €/min ]
$c_{MD}$	Käytetyn laitteiston ylläpitokustannukset [ €/min ]
$c_{RED}$	Työvaiheen työtilan hankintahinta [ €/min ]
$c_{SeD}$	Työtilan ylläpitokustannukset [ €/min ]
$c_{CD}$	Työssä kuluneiden materiaalien kustannus [ €/min ]
$c_{EnD}$	Työn kuluttaman energian kustannukset [ €/min ]
$u_D$	Työvaiheen hyötyaste ( 1 )

Tässä laskennassa tuottamaton aika  $T_{ND}$  on operaattorilta kuluva 4 minuuttia laitteiston valmisteluihin, 0,25 minuuttia poranterän ottamiseen, 0,2 minuuttia siirtäessä terän kärki materiaalin pinnalle, 0,1 minuuttia terän kulkiessa reiältä reiälle, 0,2 minuuttia, (kun terä palautuu takaisin alkuperäiseen paikkaansa), 0,2 minuuttia profiilin vapautukseen ja kiinnittämiseen. Kuljetin liikkuu 20 000mm/minuutti, joten kuljettimeen kulunut aika on profiilin pituus jaettuna 20 000 [min]. Profiilin manuaalinen kääntäminen vie 2 minuuttia, mikäli tarvitsee porata myös sen pohjalle. Kun poranterät toimivat yhtäaikaaisesti, tuottamaton aika on yhtä paljon kuin pisimmälle matkalle mitattu aika yksinään. Tuottamaton aika saadaan kaavalla 3.34 [4].

$$T_{ND} = 4 + 0,25 + 0,2 + (r_f - 1) * (0,2 + 0,2) + \sum_{r=1}^{r_f} \max \sum_{i=1}^3 (n_{ri} - 1) * 0,1 + L/20000 + \{2,4 + (r_s - 1) * 0,4 + \sum_{r=1}^{r_s} (n_{r4} - 1) * 0,1 + 2 * L/20000\} \text{ [min]} \quad (3.34)$$

Kaava yksinkertaistuu muotoon

$$T_{ND} = 4,65 + (r_f - 1) * 0,4 + \sum_{r=1}^{r_f} \max \sum_{i=1}^3 (n_{ri} - 1) * 0,1 + L/20000 + \{2,4 + (r_s - 1) * 0,4 + \sum_{r=1}^{r_s} (n_{r4} - 1) * 0,1 + 2 * L/20000\} \text{ [min]} \quad (3.34)$$

missä

$n_{ri}$	Reikien lukumäärä rivissä r suuntaan i
$r_f$	Rivien lukumäärä ensimmäisellä ajolla
$r_s$	Rivien lukumäärä toisella ajolla (alaindeksi 4 viittaa toiseen ajoon)

Toisen ajon tilanteessa profiilin oletetaan laskennallisesti menevän takaisin alkuun ja uudestaan poraukseen. Siirtopituutena käytetään 2\*profiilin pituus. Tuottava aika  $T_{PD}$  riippuu terän koosta ja sen materiaalista sekä porattavan materiaalin paksuudesta. Poran syöttönopeus on esitetty kaavassa 3.35 [4].

$$f_n = -0,0002x^2 + 0,0141x + 0,1354 \text{ [mm/kierros]} \quad (3.35)$$

Suosittelava poran pyörimisnopeus on esitelty kaavassa 3.36 [4].

$$r = \frac{V_c * 1000}{\pi * d} = 318 * \frac{V_c}{d} \text{ [kierrosta/min]} \quad (3.36)$$

Missä  $V_c$  on suositeltu leikkausnopeus ( $V_c = 40\text{m/min}$ ) terän leikkaavalle reunalla ja  $d$  [mm] on terän halkaisija. Tällöin terän pyörimisnopeuden kaava tulee kaavan 3.37 muotoon. Syöttönopeus (mm/min) saadaan kaavalla 3.38.

$$r = \frac{12\ 732}{d} \text{ [kierrosta/min]} \quad (3.37)$$

$$V_f = r * f_n \text{ [mm/min]} \quad (3.38)$$

Tuottavan ajan laskenta saa kaavan 3.39 muodon.

$$T_{PD} = \sum_{i=1}^{r_f} \max \sum_{j=1}^3 n_{ij} * \frac{d_{ij}}{12\ 732} * t_j / (-0,0002 * d_{ij}^2 + 0,0141 * d_{ij} + 0,1354) + \sum_1^{r_s} n_{is} * \frac{d_{i4}}{12\ 732} * t_4 / (-0,0002 * d_{i4}^2 + 0,0141 * d_{i4} + 0,1354) \text{ [min]} \quad (3.39)$$

missä

$n_{ij}$	Reikien lukumäärä i rivissä j suuntaan [mm]
$t_j$	Levyn paksuus j suuntaan [mm]
$d_{ij}$	Reiän halkaisija i rivissä j suuntaan [mm]
	Ala indeksi 4 viittaa toiseen ajoon.

Porauksen työntekijäkustannukset  $c_{LD}$  koostuvat yhdestä työntekijästä. Toinen on hitsausaseman operaattori ja toinen käsittelee materiaaleja sekä asettelee osat hitsattavalle paikalleen. Työntekijän tuntipalkaksi on oletettu 27,68 €/ tunti eli 0,46 €/ min.

$c_{EqD}$  on hitsauslaitteiston investointikustannukset. Laitteistoon kuuluu varsinainen hitsausasema sekä kaksi hitsauspöytää. Hitausasemassa on kaksi hitsauspäättä. Laitteiston investointikustannukset jaetaan sen oletetulla käyttöiälle 20 vuotta, huomioiden investointi-asteeksi 5 %, alkukustannukseksi 520 000 € ja jälleen myyntiarvoksi 0 €. Näistä



koostuu laitteiston investoinnille vuositasolla kustannukseksi 41 726 € ja siten  $c_{EqD} = 0,34 \text{ €/min}$ . [4].

$c_{MD}$  on laitteiston huoltokustannuksia, jotka tässä on lähdekirjallisuuden mukaisesti oletettu olevan 1000 €/vuosi eli  $c_{MD} = 0,01/\text{min}$ . [4].

$c_{RED}$  on työvaiheeseen tarvittavan tilan investointikustannukset. Kustannuksiksi on oletettu  $525 \text{ m}^2 \times 912 \text{ €/m}^2 = 478\,800 \text{ €}$  Tilan jälleenmyyntiarvoksi on arvioitu  $525 \text{ m}^2 \times 12 \text{ €/m}^2 = 6\,300 \text{ €}$  Tilan käyttöajaksi on oletettu 50 vuotta ja investointiasteeksi on laitettu 5%. Tästä saadaan tilan investointikustannuksiksi 25 882 €/vuosi eli  $c_{RED} = 0,21 \text{ €/min}$ . [4].

$c_{SeD}$  on työtilan huoltokulut  $525 \text{ m}^2 \times 72 \text{ €/m}^2$ , mistä seuraa 37 800 €/vuosi eli 0,31 €/min. [4].

$c_{CD}$  on poraukseen kuluvien materiaalien kustannukset. Porauksessa kuluvina materiaaleina ovat poranterät. Poranterän kustannus riippuu poranterän koosta ja tyypistä. Tässä laskennassa käytetään A530 HSS TiN 4xd poranterien kappalehintoja jotka ovat listattu taulukkoon 3.3 [4].

**Taulukko 3.3** (poranterien kappalehinta)

d	[mm]	14	18	22	26	32
hinta $P_{DB}$	[€]	42	62	72	119	167

Terän kestävyudeksi on oletettu 30 minuuttia. Tylstyneen poranterän voidaan teroittaa keskimäärin 15 kertaa. Tämä antaa terälle kokonaisuudessaan 450 minuuttia käyttöikää. Mikäli teroittamiseen kuluvaa kustannusta ei oteta huomioon, poranterän kustannukset saadaan laskettua kaavalla 3.40 [4].

$$C_{CD} = \sum_{k=1}^{n_{dd}} C_{CDk} = \sum_{k=1}^{n_{dd}} P_{DBk} / 450 * T_{PDk} \quad (3.40)$$

missä

$n_{dd}$  Erikokoisten poranterien lukumäärä  
 $T_{PDk}$  Eri poranterien kulutusaika yhteenlaskettuna (kaava 3.41)

$$T_{PDk} = \sum_j^4 \sum_{k=1}^{n_{dd}} n_k * \frac{d_{kj}}{12732} * t_j / (-0,0002 * d_k^2 + 0,0141 * d_k + 0,1354) \quad (3.41)$$

Kun kaavan 3.41  $T_{PDk}$  sijoitetaan kaavaan 3.40, saadaan kaava 3.42.

$$C_{CD} = \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^{n_{dd}} P_{DBk} / 450 * n_k * \frac{d_{ij}}{12732} * t_j / (-0,0002 * d_{ij}^2 + 0,0141 * d_{ij} + 0,1354) \quad (3.42)$$

Poranterien yksikköhinta minuuttia kohti on esitetty taulukossa 3.4.

**Taulukko 3.4** poranterien kulumisen hinta minuuttia kohti

d	[mm]	14	18	22	26	32
hinta $P_{DBk}$	[€/min]	0,09	0,14	0,16	0,26	0,37

$c_{EnD}$  on porauksessa käytetyn energian kustannus. Oletettu energian kulutus porauksessa on 10 kW. Energian hinta on 0,1 €/kWh. Tästä seuraa energian kustannukseksi  $c_{EnD} = 0,02$  €/min. Muiden osien kuluttamat energiat ovat merkityksettömiä verrattuna hitsauksen kuluttamaan energiaan, joten niitä ei huomioida tässä laskennassa [4].

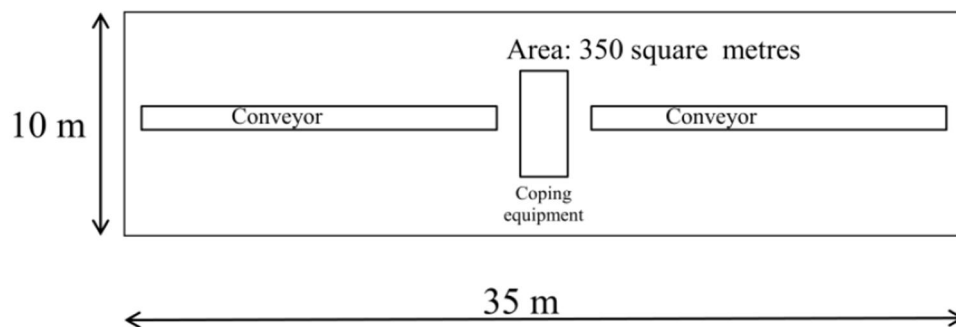
$u_D$  on porauksen käyttöaste, mikä on asetettu arvoon 1.

Porauksen kokonaiskustannukseksi saadaan siis kaava (3.43).

$$\begin{aligned}
 C_D = & (4,65 + (r_f - 1) * 0,4 + \sum_{r=1}^{r_f} \max \sum_{i=1}^3 (n_{ri} - 1) * 0,1 + L/20000 + (2,4 + (r_s - 1) * 0,4 + \sum_r^{r_s} (n_{r4} - 1) * 0,1 + 2 \\
 & * L/20000) + \sum_{i=1}^{r_f} \max \sum_{j=1}^3 n_{ij} * \frac{d_{ij}}{12732} * t_j / (-0,0002 * d_{ij}^2 + 0,0141 * d_{ij} + 0,1354) + \sum_{i=1}^{r_s} n_{is} * \frac{d_{i4}}{12732} * \\
 & t_4 / (-0,0002 * d_{i4}^2 + 0,0141 * d_{i4} + 0,1354) * (0,46 + 0,34 + 0,01 + 0,21 + 0,31) / 1 + \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^{n_{dd}} P_{DBk} / 450 * n_k \\
 & * \frac{d_{kj}}{12732} * t_j / (-0,0002 * d_{kj}^2 + 0,0141 * d_{kj} + 0,1354) + (\sum_{i=1}^{r_f} \max \sum_{j=1}^3 n_{ij} * \frac{d_{ij}}{12732} * t_j / (-0,0002 * d_{ij}^2 + 0,0141 * \\
 & d_{ij} + 0,1354) + \sum_{i=1}^{r_s} n_{is} * \frac{d_{i4}}{12732} * t_4 / (-0,0002 * d_{i4}^2 + 0,0141 * d_{i4} + 0,1354) * 0,02) \quad (3.43)
 \end{aligned}$$

### 3.3.6 Loveus

Viistämisen työvaiheessa profiiliin tehdään polttoleikkaamalla tarvittavat viisteet, kouluks ja erikoisen muotoiset reiät. Prosessi alkaa, kun operaattori asettaa profiilille tehtävät asetukset työasemalle. Pääprofiili on kiinnitetty alustaan muotoilu varten. Polttoleikkauksen liekki syttyy ja muotoilu alkaa. Kun muotoilu on tehty, liekki sammuu ja polttoleikkausleikkaustyökalu palaa takaisin aloitus asentoonsa. Profiili irrotetaan ja asetetaan uuteen asentoon seuraavaa leikkausta varten tai mikäli profiili on valmis, se poistetaan työpisteeltä. Viistämisen työpiste on esitetty kuvassa 3.7 [4].



**Kuva 3.7** Viistämisen työpiste

Viistämisen kustannusten laskeminen on esitetty kaavassa 3.44.

$$C_{Co} = (T_{NCo} + T_{PCo}) * (c_{LCo} + c_{EqCo} + c_{MCo} + c_{RECo} + c_{SeCo}) / u_{Co} + T_{PCo} * (c_{CCo} + c_{EnCo}) \quad (3.44)$$

missä

$C_{Co}$	Työvaiheen kokonaiskustannus [ € ]
$T_{NCo}$	Tuottamaton aika (vrt. kaava 3.45) [ min ]
$T_{PCo}$	Viistämisen aika työvaiheessa [ min ]
$C_{LCo}$	Yksikön työkustannus (yksi työntekijä) [ €/min ]
$C_{EqCo}$	Käytetyn laitteiston hankintahinta [ €/min ]
$C_{MCo}$	Käytetyn laitteiston ylläpitokustannukset [ €/min ]
$C_{RECo}$	Työvaiheen työtilan hankintahinta [ €/min ]
$C_{SeCo}$	Työtilan ylläpitokustannukset [ €/min ]
$C_{CCo}$	Työssä kuluneiden materiaalien kustannus [ €/min ]
$C_{EnCo}$	Työn kuluttaman energian kustannukset [ €/min ]
$U_{Co}$	Työvaiheen hyötyste ( 1 )

Tuottamatonta aikaa on 4 minuuttia laitteiston valmisteluihin, 0,5 minuuttia polttoleikkaavan pään liikuttamiseen kohdilleen ja 0,5 minuuttia liekin sytyttämiseen ja alkulämmitykseen. Leikkausjäänteet poistetaan sen jälkeen, kun polttoleikkaus on suoritettu ja profiili on poistettu leikkauspöydältä. Tähän oletetaan kuluvan 1 minuutti per profiilin metri, joten tuottamattoman ajan laskenta suoritetaan kaavalla 3.45 [4].

$$T_{NCo} = 4 + n_{Co} * (0,5 + 0,5 + 0,5) + L/20000 + \sum_{i=1}^{n_{Co}} L_{Coi} * 0,001 \text{ [min]} \quad (3.45)$$

missä

$n_{Co}$	Yksittäisten loveuksien ja viisteiden lukumäärä
$L$	Profiilin pituus [mm]
$L_{Coi}$	Loveuksen/viisteen i pituus [mm]

$T_{PCo}$  on tuottava aika. Polttoleikkaukselle oletetaan samat arvot, kuin se on oletettu kapaleessa 3.3.4. Leikkausnopeus saadaan kaavasta 3.46 [4].

$$T_{PCo} = \sum_{i=1}^{n_{Co}} L_{Coi} / v_{Coi} \text{ [min]} \quad (3.46)$$

missä

$T_{PCo}$	Tuottava aika [min]
$L_{Coi}$	Loveuksen/viisteen i pituus [mm]
$v_{Coi}$	Levyn paksuudesta riippuva leikkausnopeus [mm/min]

Kun yhtälöön huomioidaan kaavan 3.10 levyn paksuuden huomioiva osuus, kaava muuttuu muotoon 3.47 [4].

$$T_{PCo} = \sum_{i=1}^{n_{Co}} L_{Coi} / (-4,1939 * t_i + 658,67) \text{ [min]} \quad (3.47)$$

missä

$t_i$	Viistettävän osan/levyn i paksuus [mm]
-------	--

Viistämisen työntekijäkustannukset  $C_{LCo}$  koostuvat yhdestä työaseman operaattorista. Työntekijän tuntipalkaksi on oletettu 27,68 €/ tunti eli 0,46 €/ min.

$c_{EqCo}$  on leikkauslaitteiston investointikustannukset. Laitteistoon kuuluu varsinainen polttoleikkauslaitteisto sekä kuljetushinnat asemalle ja sieltä pois. Laitteiston investointikustannukset jaetaan sen oletetulla käyttöiälle 20 vuotta, huomioiden investointiasteeksi 5 %, alkukustannukseksi 430 000 € ja jälleen myyntiarvoksi 0 €. Näistä koostuu laitteiston investoinnille vuositason kustannukseksi 34 504 € ja siten  $c_{EqCo} = 0,29$  €/min. [4].

$c_{MCo}$  on laitteiston huoltokustannuksia, jotka tässä on lähdekirjallisuuden mukaisesti oletettu olevan 1000 €/vuosi eli  $c_{MCo} = 0,01$ /min. [4].

$c_{RECo}$  on työvaiheeseen tarvittavan tilan investointikustannukset. Kustannuksiksi on oletettu  $350 \text{ m}^2 \times 912 \text{ €/m}^2 = 319\,200 \text{ €}$ . Tilan jälleenmyyntiarvoksi on arvioitu  $350 \text{ m}^2 \times 12 \text{ €/m}^2 = 4\,200 \text{ €}$ . Tilan käyttöajaksi on oletettu 50 vuotta ja investointiasteeksi on laitettu 5%. Tästä saadaan tilan investointikustannuksiksi 14 790 €/vuosi eli  $c_{RECo} = 0,14$  €/min. [4].

$c_{SeCo}$  on työtilan huoltokulut  $350 \text{ m}^2 \times 72 \text{ €/m}^2$ , mistä seuraa 25 200 €/vuosi eli 0,21 €/min. [4].

$c_{CCCo}$  on viistämiseen kuluvien materiaalien kustannukset. Työvaiheessa käytetään polttoleikkausta, joten kuluvien materiaalien kustannukset ovat laskettu kappaleen 3.3.4 mukaan. Tästä saadaan kaava 3.48 [4].

$$C_{CCCo} = 0,12 + 0,1 + (1E - 05 * t_i^2 + 0,001 * t_i + 0,0224) * 4,18 \text{ [€/min]} \quad (3.48)$$

missä

$t_i$  Viistettävän osan/levyn  $i$  paksuus [mm]

$c_{EnCo}$  on polttoleikkauksen ja kuljettimien käyttämä energian kustannus. Energian kustannus on merkityksettömän pieni, joten niitä ei ole huomioitu tässä laskennassa [4].

$u_{Co}$  on viistämisen käyttöaste, mikä on asetettu arvoon 1.

Viistämisen kokonaiskustannukseksi saadaan siis kaava (3.49) ja (3.50).

$$C_{Co} = (4 + n_{Co} * (0,5 + 0,5 + 0,5) + L_o/20000 + \sum_{i=1}^{n_{Co}} L_{Coi} * 0,001 + \sum_{i=1}^{n_{Co}} L_{Coi} / (-4,1939 * t_i + 658,67)) * (0,46 + 0,29 + 0,01 + 0,12 + 0,18)/1 + \sum_{i=1}^{n_{Co}} L_{Coi} / (-4,1939 * t_i + 658,67) * (0,22 + (1E - 05 * t_i^2 + 0,001 * t_i + 0,0224) * 4,18) \text{ [€]} \quad (3.49)$$

→

$$C_{Co} = (4 + n_{Co} * 1,5 + L_o/20000 + \sum_{i=1}^{n_{Co}} L_{Coi} * 0,001 + \sum_{i=1}^{n_{Co}} L_{Coi} / (-4,1939 * t_i + 658,67)) * 1,06 + \sum_{i=1}^{n_{Co}} L_{Coi} / (-4,1939 * t_i + 658,67) * ((0,22 + 1E - 05 * t_i^2 + 0,001 * t_i + 0,0224) * 4,18) \text{ [€]} \quad (3,50)$$

### 3.3.7 Osien valmistus

Kokoonpanovaiheessa pääosaan liitettävillä osilla tarkoitetaan tässä työssä levystä tehtyjä varusteluosia. Niiden tehtävä on vahvistaa profiilia ja/tai toimia liitoslevyinä. Vahvistuksena levyjen tarkoitus on säästää materiaalia. Mikäli kokoonpanon profiilit suunniteltiin kestämaan kaikki rasitukset ilman paikallisen stabiliteetin menetystä tai yksittäisten kohtien lujuuskapasiteetin ylitystä, profiilit olisivat merkittävästi ylimitoitettuja valtaosalle niihin kohdistuvista rasituksista. Yleisenä esimerkkinä voidaan pitää pistevoiman aiheuttamaa I-profiilin hoikan uuman paikallista lommahdusta tai sen leikkauskapasiteetin ylitystä. Tällöin suhteessa kevyen jäykistävän varusteluosan liittäminen, stabiliteetin kannalta tai lujuuden kannalta kriittiseen kohtaan, säästää materiaalia merkittävästi. Materiaalin ollessa noin 38 % koko teräsrunkoisen rakennuksen valmistuskustannuksista [4, sivu 1], sillä on merkittävä osa kustannusten kertymisestä. Liitososina levyjen tehtävä on välittää pääosan kuormat seuraavalle kokoonpanolle. Levyjen kustannukset lasketaan koostuvan materiaaleista (vrt. kappale 3.2), materiaalin suihkupuhdistuksesta (vrt. 3.3.1), levyjen leikkaamisesta puhdistetusta materiaalista (vrt. kappale 3.3.2) ja levyjen rei'ittämisestä poraamalla (vrt. kappale 3.3.5). Tästä saadaan levyistä tehtyjen varusteluosien kustannuksille kaava 3.51 [4].

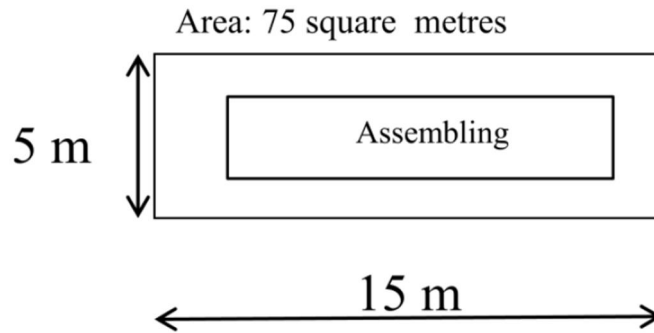
$$C_{PF} = C_{SM} + (C_B + C_{Cu} + C_D)/u_{PF} \text{ [€]} \quad (3.51)$$

missä

$C_{PF}$	Levyn kustannukset [€]
$C_{SM}$	Levyn materiaalikustannukset [€]
$C_B$	Levyn suihkupuhdistuksen kustannukset
$C_{Cu}$	Levyn leikkauskustannukset [€]
$C_D$	Levyn reikien porauksen kustannukset [€]

### 3.3.8 Kokoonpano

Kokoonpanovaiheessa pääosaan liitetään varusteluosat sekä sekundääriset profiilit. Liittäminen tapahtuu yleisesti hitsaamalla tai pulttaamalla. Lähdekirjallisuus käsitti liitettäviksi varusteluosiksi levyt sekä kulmaprofiilit. Tämän työn laajuuteen kuuluvien liitosvaihtoehtojen tapauksessa kaikki varusteluosat ovat levyjä, jotka ovat rei'itetty poraamalla ja kiinnitetty pääosaan hitsaamalla. Kuvassa 3.8 on esitetty kokoonpanon työpiste [4].



**Kuva 3.8** Kokoonpanon työpiste

Kokoonpanon kustannusten laskeminen on esitetty kaavassa 3.52.

$$C_{PA} = (T_{NPA} + T_{PPA}) * (c_{LPA} + c_{EqPA} + c_{REPA} + c_{SePA}) / u_{PA} + c_{CPA} + T_{PPA} * c_{EnPA} \quad (3.52)$$

missä

$C_{PA}$	Työvaiheen kokonaiskustannus [ € ]
$T_{NPA}$	Tuottamaton aika (vrt. kaava 3.45) [ min ]
$T_{PPA}$	Kokoonpanon aika työvaiheessa [ min ]
$c_{LPA}$	Yksikön työkustannus (yksi työntekijä) [ €/min ]
$c_{EqPA}$	Käytetyn laitteiston hankintahinta [ €/min ]
$c_{REPA}$	Työvaiheen työtilan hankintahinta [ €/min ]
$c_{SePA}$	Työtilan ylläpitokustannukset [ €/min ]
$c_{CPA}$	Työssä kuluneiden materiaalien kustannus [ €/min ]
$c_{EnPA}$	Työn kuluttaman energian kustannukset [ €/min ]
$u_{PA}$	Työvaiheen hyötyste ( 1 )

Tuottamaton aika ja laitteiston huoltokustannukset kokoonpanovaiheessa ovat merkityksellisiä. Kuluvien materiaalien oletetaan olevan ajasta riippumattomia.

Kokoonpano hitsaamalla:

Hitsattavien osien alustava kiinnitys profiiliin tapahtuu asemoimalla osa kohdalleen ja pistehitsaamalla se kiinni profiiliin. Asemointi oletetaan tapahtuvan ilman valmista asennustukea. Osien purseen poisto tehdään ennen asemointia. Kiinnitettävien osien oletetaan olevan 300 mm – 1000 mm pitkiä ja asemointiin arvioidaan kuluvan 0,5 min. Osan kiinnitys pidikkeisiin kestää 0,18 minuuttia ja pidikkeiden irrotukseen kestää 0,09 minuuttia per osa. Osan pistehitsaukseen kestää 0,09 minuuttia per hitsi (olettaen 3 kpl pistehitsiä) sekä 0,5 minuuttia per osa kiinteästi. Asemoivalle pistehitsaukselle tuottavaksi ajaksi per osa saadaan kaava 3.53 [4].

$$T_{PTa} = 0,5 + 0,18 + 0,09 + 0,5 + 0,09 * 3 + 0,05 = 1,59 \text{ [min]} \quad (3.53)$$

Varusteluosan varsinainen hitsaus suoritetaan lähdemateriaalin [4] oletuksen mukaisesti MAG M (Metal Active Gas) hitsauksena. Hitsauksen on oletettu tapahtuvan jalkoasennossa. Hitsauslangan paksuudeksi on valittu 1 mm. Hitsauksen nopeus pienahitsille saadaan kaavasta 3.54 ja V-hitsille kaavasta 3.55 [4].

Pienahitsaukseen kuluva aika:

$$T_{Pfw} = L_{fw}/1000 * (0,4988 * a^2 - 0,0005 * a + 0,0021) \text{ [min]} \quad (3.54)$$

missä:

$L_{fw}$	Hitsin pituus [mm]
$a$	Hitsin a-mitta [mm]

Puoli V hitsaukseen kuluva aika:

$$T_{Pbw} = L_{bw}/1000 * (0,249 * b^2 - 0,0096 * b + 0,0506) \text{ [min]} \quad (3.54)$$

missä:

$L_{fw}$	Hitsin pituus [mm]
$a$	Hitsin a-mitta [mm]

Samalla työasemalla tehtäisiin myös mahdolliset pulttaukset, mutta tutkittavissa liitoksissa ei ole konepajalla kiinnitettäviä pultteja, joten pulttauksen viemää aikaa ja kustannuksia ei oteta tässä huomioon.

Kokoonpanohitsaamisen työntekijäkustannukset  $c_{LPA}$  koostuvat yhdestä hitsaajasta. Työntekijän tuntipalkaksi on oletettu 27,68 €/ tunti eli 0,46 €/ min.

$c_{EqPA}$  on hitsauslaitteiston investointikustannukset. Laitteistoon kuuluu MAG hitsauslaite. Laitteiston investointikustannukset jaetaan sen oletetulla käyttöiälle 10 vuotta, huomioiden investointiasteeksi 5 %, alkukustannukseksi 5 000 € ja jälleen myyntiarvoksi 0 €. Näistä koostuu laitteiston investoinnille vuositasolla kustannukseksi 3 672 € ja siten  $c_{EqPA} = 0,01 \text{ €/min}$ . [4].

$c_{REPA}$  on työvaiheeseen tarvittavan tilan investointikustannukset. Kustannuksiksi on oletettu  $75 \text{ m}^2 \times 912 \text{ €/m}^2 = 68\,400 \text{ €}$  Tilan jälleenmyyntiarvoksi on arvioitu  $75 \text{ m}^2 \times 12 \text{ €/m}^2 = 900 \text{ €}$  Tilankäyttö ajaksi on oletettu 50 vuotta ja investointi asteeksi on laitettu 5%. Tästä saadaan tilan investointikustannuksiksi 3 692 €/vuosi eli  $c_{REPA} = 0,03 \text{ €/min}$ . [4].

$c_{SePA}$  on työtilan huoltokulut  $75 \text{ m}^2 \times 72 \text{ €/m}^2$ , mistä seuraa 5 400 €/ vuosi eli 0,04 €/min. [4].

$c_{CPA}$  on hitsaamiseen kuluvien ajasta riippumattomien materiaalien kustannukset. Työväiheessä käytetään MAG hitsausta, joten kuluvien materiaalien kustannukset ovat hitsaus lanka ja hitsauksessa käytetty suojakaasu. Hitsauslangan kulutus ( $w_{cf}$ ) saadaan kaavoista 3.55 ja 3.56 [4].

$$w_{cf} = L_{fw} * a^2 * 0,00000785 \text{ [kg]}, \text{ pienahitsille} \quad (3.55)$$

$$w_{cb} = L_{bw} * b^2 / 2 * 0,00000785 \text{ [kg]}, \text{ puoli V hitsille} \quad (3.56)$$

Yksikköhinta 1 mm paksulle hitsauslangalle on 1,91 €/kg [4].

Suojakaasun kulutus käytetyssä MAG hitsauksessa on 0,4 m<sup>3</sup>/kg lankaa. Kaasun yksikköhinta on 11,10 €/m<sup>3</sup>, mistä seuraa kaasun hinnaksi 4,44 €/kg hitsauslankaa. Yhdistäessä tämän kaavoihin 3.55 ja 3.56 saadaan hitsauksen kustannuksien kaavoiksi 3.57 pienahitsaukselle ja 3.58 puoli V-hitsaukselle [4].

$$C_{CPA} = L_{fw} * a^2 * 0,00000785 * (1,91 + 4,44) \text{ [€]}, \text{ pienahitsaukselle} \quad (3.57)$$

$$C_{CPA} = L_{bw} * b^2 / 2 * 0,00000785 * (1,91 + 4,44) \text{ [€]}, \text{ puoli V hitsaukselle} \quad (3.58)$$

$c_{EnPA}$  on hitsauksen käyttämä energian kustannus. 1 mm umpilangalla, 200 ampeerin ja 30 voltin asetuksilla energian kulutus on 6 kW. Kun energian hinta on 0,1 kWh niin energian kulutus  $c_{EnPA}=0,01 \text{ €/min}$ . [4].

$u_{PA}$  on kokoonpanohitsauksen käyttöaste, mikä on asetettu arvoon 1.

Kokoonpanohitsauksen kokonaiskustannukseksi saadaan kaava (3.59).

$$\begin{aligned} C_{PA} = & (1,59 + L_{fw}/1000 * (0,4988 * a^2 - 0,0005 * a + 0,0021) + L_{bw}/1000 \\ & * (0,249 * b^2 + 0,0096 * b - 0,0506)) * (0,46 + 0,01 + 0,03 + 0,04)/1 \\ & + (L_{fw} * a^2 + L_{bw} * b^2 / 2) * 7,85 * 10^{-6} * (1,91 + 0,44) + (L_{fw}/1000 \\ & * (0,4988 * a^2 - 0,0005 * a + 0,0021) + L_{bw}/1000 * (0,249 * b^2 + 0,0096 \\ & * b - 0,0506) * 0,01) \text{ [€]} \end{aligned} \quad (3.59)$$

### 3.3.9 Jälkikäsittely ja tarkastukset

Jälkikäsittelyssä poistetaan profiilin purseet ja tarkastuksissa käydään läpi hitsit. Nämä työvaiheet tehdään kokoonpanon työpisteessä. Jälkikäsittelyn nopeudeksi oletetaan 2 metriä per minuutti eli 0,0005 [min/mm].

Hitsientarkastusmenetelmän valitsee rakennesuunnitteluja. Tässä laskennassa käytetään ultraääni-, ja magneettipartikkeli tarkastusta. Tarkastuksen suorittaa yksi työntekijä. Ultraäänitarkastuksen nopeudeksi (raportointi mukaan lukien) on oletettu 1,0 metriä per tunti eli 0,06 min/mm. Magneettipartikkelitarkastukselle nopeudeksi on oletettu 4,0 metriä per tunti eli 0,015 min/mm. Jälkikäsittelyn ja tarkastusten kustannukset saadaan kaavasta 3.60 [4].

$$C_{PT} = T_{PPT} * (c_{LPT} + c_{REPT} + c_{SePT}) / u_{PT} \text{ [€]} \quad (3.60)$$

Jälkikäsittelyn työntekijäkustannukset  $c_{LPT}$  koostuvat yhdestä työntekijästä. Työntekijän tuntipalkaksi on oletettu 27,68 €/tunti eli 0,46 €/min.



$C_{REPT}$  on työvaiheeseen tarvittavan tilan investointikustannukset. Työtilana on kokoonpanoon käytetty tila. Kustannuksiksi on oletettu  $75 \text{ m}^2 \times 912 \text{ €/m}^2 = 68\,400 \text{ €}$  Tilan jälleenmyyntiarvoksi on arvioitu  $75 \text{ m}^2 \times 12 \text{ €/m}^2 = 900 \text{ €}$  Tilan käyttöajaksi on oletettu 50 vuotta ja investointiasteeksi on laitettu 5%. Tästä saadaan tilan investointikustannuksiksi  $3\,692 \text{ €/vuosi}$  eli  $C_{REPT} = 0,03 \text{ €/min.}$  [4].

$C_{SEPT}$  on työtilan huoltokulut  $75 \text{ m}^2 \times 72 \text{ €/m}^2$ , mistä seuraa  $5\,400 \text{ €/vuosi}$  eli  $0,04 \text{ €/min.}$  [4].

Jälkikäsitteilyn ja tarkastusten kustannuskaavan voi esittää myös muodossa 3.61.

$$C_{PT} = (L_{PT} * 0,0005 + L_{UT} * 0,06 + L_{MT} * 0,015) * (0,46 + 0,03 + 0,04) / 1 \text{ [€]} \quad (3.61)$$

missä

$L_{PT}$	Profiilin purseista poistettavien reunojen pituus [mm]
$L_{UT}$	Ultraäänitarkastusten pituus [mm]
$L_{MT}$	Magneettipartikkelitarkastusten pituus [mm]

### 3.3.10 Pinnoitus

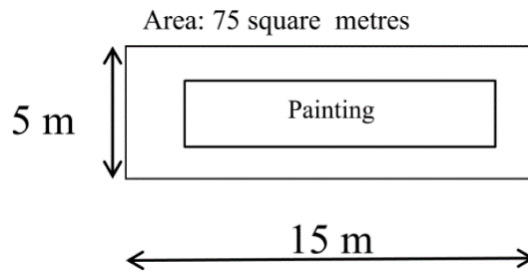
Tässä työssä pinnoitustyövaiheeseen lasketaan kokoonpanon maalaus ja kuivaus työvaiheet. Maalaus suoritetaan ruiskumaalauksena. Maalausjärjestelmän vaatiessa useamman maalikerroksen, kokoonpanon oletetaan olevan sisällä kuivuessaan seuraavaan maalaukseen. Ennen kuin kokoonpano voidaan viedä pihalle, maalikerroksen täytyy olla vähintäänkin kosketuskuiva. Työn suorittaa yksi työntekijä. Kokoonpano lepää tuilla eikä sitä siirrellä maalauksen aikana. Maalausnopeus riippuu ruiskun suuttimesta ja käytetystä paineesta. Tässä työssä ruiskuksi oletetaan lähdemateriaalin mukaisesti  $0,4 \text{ mm}$  (teknos) ruisku. Ruiskulla saa  $80 \%$  peittävyys. Paine on asetettu niin, että maaliruiskusta tulee  $0,9 \text{ litraa per minuutti}$  eli  $900\,000 \text{ mm}^3 / \text{min}$ . Suunnittelija määrittää maalausjärjestelmän tyypin, kuivien kerrosten (DFT) paksuuden sekä kappaleen puhdistusasteen. Tässä kohteessa puhdistusasteeksi on asetettu  $Sa2\frac{1}{2}$ . Tämä puhdistus taso on saavutettavissa suihkupuhdistusvaiheessa.

Todellisen kulutetun maalin määrään vaikuttaa maalattavan pinnan laatu, maalikerroksen paksuus. Tähän laskentaan on oletettu maalin kulutukselle ( $t_{loss}$ ) kaava (3.62) [4].

$$t_{loss} = 10\mu\text{m} + 20\% * DFT + 5\% * DFT + 5\% * DFT \text{ [}\mu\text{m]} \quad (3.62)$$

$$t_{loss} = 0,01 + 0,3 * DFT \text{ [mm]} \quad (3.62)$$

Kostean kalvonpaksuuden (WFT), joka täytyy ruiskuttaa, riippuu maalityypistä. Tässä työssä oletetuille maaleille, WTF on  $40 \%$  -  $50 \%$ . Kuvassa 3.9 on kuva maalaustyöpis- teestä.



**Kuva 3.9** Maalauksen työpiste

Maalaustyön kustannuksissa ei oteta huomioon laitteistoa, laitteiston huoltoa tai kulutettua energiaa niiden olemattoman pienen vaikutuksen vuoksi. Myöskään tuottamaton aikaa ei lasketa tässä työvaiheessa. Tällöin maalauksen kustannukset lasketaan kaavan 3.63 mukaan [4].

$$C_P = T_{PP} * (c_{LP} + c_{REP} + c_{SEP}) / u_P + c_{CP} \text{ [€]} \quad (3.63)$$

missä

$C_P$	Työvaiheen kokonaiskustannus [ € ]
$T_{PP}$	Tuottavan maalauksen aika (vrt. kaava 3.64) [ min ]
$c_{LP}$	Yksikön työkustannus (yksi työntekijä) [ €/min ]
$c_{REP}$	Työvaiheen työtilan hankintahinta [ €/min ]
$c_{SEP}$	Työtilan ylläpitokustannukset [ €/min ]
$c_{CP}$	Työssä kuluneiden materiaalien kustannus [ €/min ]
$u_P$	Työvaiheen hyötyste ( 1 )

Maalauksen tuottava aika  $T_{PP}$  on laskettavissa tarvittavan kostean maalipinnan paksuudella ja maaliruiskun virtausnopeudella kaavalla 3.64.

$$T_{PP} = \sum_{i=1}^{n_f} 1/v_{si} * (DFT_i + t_{iloss}) / f_{pg} * A \text{ [min]} \quad (3.64)$$

missä

$n_f$	Maalikerrosten lukumäärä
$v_{si}$	Kuivuneen maalin tilavuus maalikerroksessa i [≤1]
$DFT_i$	Kuivuneen maalin paksuus maalikerroksessa i [mm]
$t_{iloss}$	Paksuuden menetys maalikerroksessa i [mm]
$f_{pg}$	Maaliruiskun läpi kulkenut virtaus [mm <sup>3</sup> /min]
$A$	Kokoonpanon maalattava pinta-ala [mm <sup>2</sup> ]

Kohteen maalausjärjestelmäksi on valittu EPZn(R)EPPUR160/3-FeSa2½ [11, 10.1]. Lähimmäksi näitä arvoja päästään käyttämällä lähdemateriaalin [4] liitteen 9.5 maalausjärjestelmä vaihtoehtoista EP160/3-FeSa2½. Ottaen huomioon kohteen erityisen vaativan maalin, on perusteltua korottaa lähdemateriaalin ehdottamia kustannuksia maalille raaka-aineena ja käyttää PUR120/2 maalin yksikköhintoja.

Tästä saadaan valitulla maalausjärjestelmällä ja kaavalla 3.64 tulokseksi kaava 3.65.

$$T_{PPEP} = 0,481/900000 * A \text{ [min]} \text{ (EP160/3)} \quad (3.65)$$

Tässä kerroin  $0,481 \text{ [mm}^3\text{]}$  kuvastaa maalin kulutusta per  $1 \text{ mm}^2$  jotta saavutetaan tarvittu maalipinnan paksuus  $160 \text{ }\mu\text{m}$ .

Pintakäsittelyn työntekijäkustannukset  $c_{LP}$  koostuvat yhdestä työntekijästä. Työntekijän tuntipalkaksi on oletettu  $27,68 \text{ €/tunti}$  eli  $0,46 \text{ €/min}$ .

$c_{REP}$  on työvaiheeseen tarvittavan tilan investointikustannukset. Kustannuksiksi on oletettu  $75 \text{ m}^2 \times 912 \text{ €/m}^2 = 68\,400 \text{ €}$  Tilan jälleenmyyntiarvoksi on arvioitu  $75 \text{ m}^2 \times 12 \text{ €/m}^2 = 900 \text{ €}$  Tilan käyttöajaksi on oletettu 50 vuotta ja investointiasteeksi on laitettu 5%. Tästä saadaan tilan investointikustannuksiksi  $3\,692 \text{ €/vuosi}$  eli  $c_{REP} = 0,03 \text{ €/min}$ . [4].

$c_{SeP}$  on työtilan huoltokulut  $75 \text{ m}^2 \times 72 \text{ €/m}^2$ , mistä seuraa  $5\,400 \text{ €/vuosi}$  eli  $0,04 \text{ €/min}$ . [4].

$c_{CP}$  on maalaamiseen kuluvien materiaalien kustannukset. Työvaiheessa käytetty maalin määrä saadaan laskettua kaavalla 3.66 [4].

$$T_{PP} = \sum_{i=1}^{n_f} u_{CP}/v_{si} * (DFT_i + t_{iloss})/f_{pg} * A \text{ [min]} \quad (3.66)$$

Missä  $u_{CP}$  on maalin yksikköhinta [ $\text{€/mm}^3$ ] [4, liite 9.5]. Kaava saadaan muotoon 3.67.

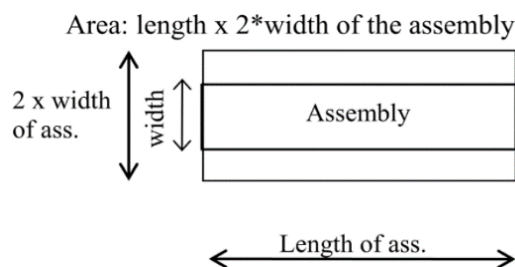
$$c_{CPPu} = 4,58E - 06 * A \text{ [€]} \quad (3.67)$$

Maalauksen kokonaiskustannukseksi saadaan siis kaava (3.68).

$$C_P = \sum_{i=1}^{n_f} 1/v_{si} * (DFT_i + t_{iloss})/f_{pg} * A * ((0,46 + 0,03 + 0,04)/1 + \sum_{i=1}^{n_f} u_{CP}/v_{si} * (DFT_i + t_{iloss}) * A \text{ [€]} \quad (3.69)$$

Maalin kuivuminen

Maalatun kokoonpanon täytyy kuivua ennen seuraavaa maalauskerrosta tai jälkikäsittelyssä kuivua kosketus kuivaksi. Kokoonpano jätetään kuivumaan tilaan joka on vähintään kokoonpanon pituus kertaa sen kapein mitta kertaa kaksi (kaava 3.71). Kuvassa 3.10 on esitetty kokoonpanon kuivumiseen käytetty tila.



**Kuva 3.10** Kuivumiseen tarvittu tila.

Kuivumisen aiheuttamat kustannukset koostuvat kokoonpanon tarvitseman tilan investointi- ja huoltokustannuksista. Tällöin kuivumisen aiheuttamat kustannukset saadaan laskettua kaavasta 3.70 [4].

$$C_{Dy} = \sum_{i=1}^{n_f} T_{Dyi} * (c_{ReDy} + c_{SeDy}) * A_{Dy} \text{ [€]} \quad (3.70)$$

missä

$T_{Dyi}$  Maalauskerroksen i kuivumisaika [min]  
 $A_{Dy}$  Kokoonpanon kuivumiseen tarvittava alue (vrt. kaava 3.71)

$$A_{Dy} = L_A * 2 * W_{Amin} \text{ [m}^2\text{]} \quad (3.71)$$

missä

$L_A$  Kokoonpanon pituus [m]  
 $W_{Amin}$  Kokoonpanon lyhimmän sivun mitta [m]

$c_{ReDy}$  on kokoonpanon kuivattamiseen tarvittavan tilan investointikustannukset. Kustannuksiksi on oletettu 912 €/m<sup>2</sup>. Tilan jälleenmyyntiarvoksi on arvioitu 12 €/m<sup>2</sup>. Tilan käyttöajaksi on oletettu 50 vuotta ja investointiasteeksi on laitettu 5%. Tästä saadaan tilan investointikustannuksiksi 49 €/m<sup>2</sup>a eli  $c_{ReDy} = 0,00041 \text{ €/m}^2\text{min}$ . [4].

$c_{SeDy}$  on kuivumistilan huoltokulut 72 €/m<sup>2</sup>a, mistä seuraa 0,00060 €/m<sup>2</sup>min). [4].

Kuivumisen kustannusten kaava saadaan muotoon (3.72).

$$C_{Dy} = \sum_{i=1}^{n_f} T_{Dyi} * 0,00101 * L_A * 2 * W_{Amin} \text{ [€]} \quad (3.72)$$

Kohteessa käytetyn maalin perusteella saadaan kustannuksille kaava 3.73.

$$C_{Dy} = 3,28 * L_A * W_{Amin} \text{ [€]} \quad (3.73)$$

### 3.4 Kuljetus

Tämän diplomityön tavoitteena oli vertailla kahden eri liitostyyppin kustannuksellisia eroja. Liitosvaihtoehdot ovat samassa kokoonpanossa joten kuljetuksellisesti liitoksilla ei ole kustannuseroja. Tästä syystä kuljetuksen vaikutusta kustannuslaskentaan ei ole käyty tässä työssä läpi.

### 3.5 Asennus

Kokoonpanojen asennus työmaalla koostuu yleisesti paikalle saapuneen osan kuljetuksesta, mahdollista välivarastoinnista työmaan alueella, nostosta paikalleen ja kiinnittämistä esimerkiksi pulttaamalla tai hitsaamalla. Tässä työssä perehdytään liitosvaihtoehtojen kustannusvaikutuksiin. Tällöin kuljetuksesta nostot ja mahdolliset välivarastoinnit

työmaalla ovat kustannuksiltaan samat, joten niiden vaikutuksia ei tutkita tässä. Kiinnityksessä on havaittavissa eroja. Universaaliliitoksen asennuksessa on merkittävä määrä pultteja, kun taas leikkauspala liitoksessa, pulttien määrä on selkeästi pienempi. Asennusryhmään oletetaan ainakin kolme henkilöä (1 nosturikuski, 1 pääasentaja, 1 avustava asentaja).

Liitosvaihtoehdossa det. 14, eli poskilevyllisessä universaaliliitoksessa, asennus alkaa maassa. I-profiilien (paarteiden) ylälaippaan tulevat levyt PL1 ja PL12 asennetaan kiinni. Kiinnitys on väliaikainen kokoonpanon asemointiin ja tukemiseen varsinaisessa kiinnitysvaiheessa. Tällöin kaikkia PL1:sen ja PL11:sen pultteja ei tarvitse kiinnittää. Kiinnityksessä oletetaan 4 ensimmäistä (profiilin päädyn puoleista) pulttia. Näiden levyjen avulla kokoonpano saadaan paikalleen ja hieman tuettua. Nyt paarteiden uumalevyt voidaan asentaa ja kiristää C-luokan mukaisesti. Paarteiden alalaipan levyt kiinnitetään C-kiinnitysluokan mukaisesti. Nyt asennuksen helpottamiseksi kiinnitetyt pultit paarteiden ylälaipasta voi avata ja kiinnittää uudelleen laipan sisäpuolisen levyn kanssa. Tämä kiinnitys tehdään C-kiinnitysluokan mukaisesti. Huomioitavaa on kuitenkin käyttää uusia pultteja kiristyksessä eikä asennuksen avustuksessa käytettyjä pultteja. Näitä pultteja ei kuitenkaan lasketa hukaksi jokaisella kiinnityksellä, vaan niitä voidaan käyttää jokaisessa vastaavassa liitoksessa asennuksen avustuksessa. Diagonaalin kiinnitysvaihe on suoritettu asennuksen johdon harkinnan mukaisessa järjestyksessä, riippuen olosuhteista ja kuinka valmistustoleranssit ovat onnistuneet. Kaikessa asennuksessa on kuitenkin huomioitava kohteen toteutuseritelmä [11].

Liitosvaihtoehdo det 4 eli leikkauspalaliitos nostetaan paikalleen ja asennus on detalji 14:ta suoraviivaisempi. Pultit kiristetään asennuksesta vastaavan henkilön valitsemassa järjestyksessä kohteen toteutuseritelmä huomiodien [11]. Pultit kiristetään E-kiinnitysluokkaan.

Asennuskustannukset koostuvat työntekijöiden palkoista, nostoon käytettyjen laitteiden vuokrasta (nosturi kokoonpanolle, henkilönostin asentajille) sekä kiinnittämiseen tarvittavien pulttien hinnasta. Tästä seuraa kustannuseroa liitosten välille, joiden pulttien lukumäärässä on selvää eroa. Tässä kohteessa käytetään isoja ja normaalia lujempia pultteja suurissa määrin. Näiden pulttien yksikköhinnat alkavat merkitsemään myös kohteessa tutkittavien liitosvaihtoehtojen välillä. Liitosvertailuissa kokoonpanojen varsinaiseen nostamiseen ja koukun palauttamiseen kuluva aika on sama, joten niiden vaikutuksia ei huomioida tässä. Asennuksen kustannukset saadaan kaavasta 3.74 [4].

$$C_E = T_E * (c_{LE} + c_{EQE})/u_E + c_{EP} \text{ [€]} \quad (3.74)$$

missä

$C_E$	Kokoonpanon asennuskustannus [€]
$T_E$	Asennukseen kuluva aika [min]
$T_{EI}$	Nostoon kulunut aika [min]

	$T_{Ej}$	Pulttaamiseen kulunut aika (kaava 3.75) [min]
	$T_{Em}$	Henkilönostimen liikuttamiseen kulunut aika [min]
	$T_{Er}$	Nosturin koukun palautukseen kulunut aika [min]
$c_{LE}$		Työntekijäkustannukset [€/min]
$c_{EqE}$		Nostolaitteiston kustannukset [€/min]
$u_E$		Käyttöaste (1)
$c_{Ep}$		Asennuksessa käytettyjen pulttien yhteishinta [€]
		$c_{Ep} = \text{pultin kappalehint} \cdot l_{km}$

Kuten edellä mainittiin, nostoon ( $T_{Ei}$ ) ja nosturin koukun palauttamisen ( $T_{Er}$ ) kuluva aikaa ei huomioida liitosvaihtoehtojen kustannuslaskennassa. Painoarvo on pultitukseen kuluneessa ajassa  $T_{Ej}$  (vrt. kaava 3.75).

Kokoonpanon pultittamiseen kuluva aika  $T_{Ej}$ .

$$T_{Ej} = 0,5 \cdot n_{bi} - 0,42 \text{ [min]} \quad (3.75)$$

missä  $n_{bi}$  = kiinnitettävien pulttien lukumäärä [ $\geq 2$ ]

Henkilönostimen liikuttamiseen kokoonpanon päästä päähän kuluva aika  $T_{Em}$  lasketaan henkilönostimen nopeudella 30m/min ja kokoonpanon pituudella  $L_A$ . Tässä työssä tutkittava kokoonpano on ulokkeellinen ristikko. Kokoonpanolla on vain yksi kiinnitettävä pää, joten henkilönostimen liikuttamiseen kulutettu aika on käytännössä nolla.

Tässä työssä oletetaan työmaan olevan riittävän kaukana työntekijöiden omasta paikakunnasta, jolloin heidän palkkakustannuksiin on huomioitava myös päiväraha. Päiväraha on tässä työssä 34 €/vrk eli 0,07 €/min. Kun normaaliksi asentajan palkaksi on asetettu 26,84 €/h (0,45 €/min), tästä saadaan työntekijän kustannukseksi 0,52 €/min (per asentaja). Lähdekirjallisuuden mukaisesti asennusryhmän kooksi oletetaan kuusi henkilöä, josta nosturikuskin palkka kuuluu nosturin vuokraan. Tällöin viiden hengen palkkakustannukseksi saadaan 2,6 €/minuutti [4].

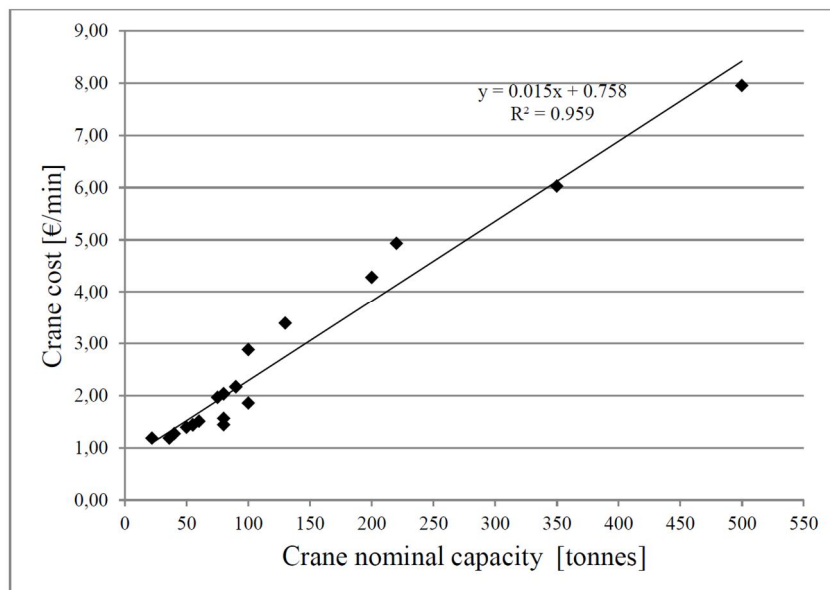
Työmaan kiinteisiin kustannuksiin on oletettu 6 m<sup>2</sup> sosiaalitiloja per työntekijä ja 12 m<sup>2</sup> työnjohtajan työmaatoimisto. Edellä mainittujen tilojen vuokraus on oletettu olevan kuukaudessa 10 €/m<sup>2</sup>. Kokonaisuudessaan 42 m<sup>2</sup> tilojen kustannukset ovat 140/viikko työntekijää kohti. Tähän lisättynä työntekijöiden matkakorvaukset, jotka tässä työssä on oletettu olevan 2x200 km/henkilö. Matkakorvauksena on 0,42€/km. Yhteensä näistä kertyy 0,5 €/min viidelle työntekijälle [4].

## Laitteistokustannukset

### Nosturi

Nosturin valinta perustuu nostettavien rakenneosien painoon, millaisella etäisyydellä vaakasuunnassa ja mihin korkeuteen kyseisiä rakenneosia pitää pystyä siirtämään. Nosturien tyypit jakautuvat tässä yhteydessä, kiinteisiin torninostureihin, raiteilla kulkeviin

torninostureihin ja täysin mobiileihin teleskooppinostovarren omaaviin nostureihin. Kohteen vaatimien suurten etäisyyksien ja kohtuullisen suurien rakennepainojen takia käytetään mobiilia teleskooppivartista nosturia. Kyseinen nosturilaitteisto ja sen operoitsija on oletettu vuokratuksi. Nosturin vuokraan kuuluu nosturi, operoitsija, polttoaineet, vakuutukset ja kaikki mikä nostoon liittyy varusteiltaan. Haapion väitöskirjassa on tiedusteltu neljältä suomalaiselta nostureita vuokraavalta yritykseltä kalustonsa vuokrahintoja. Kaikkiaan 21 tarjouksesta on saatu yhtälö nosturin nostokapasiteetin ja vuokrahinnan välille kuva 3.11. Käytettävän kaluston nostokapasiteetti oletetaan tässä työssä 80 tonniin.



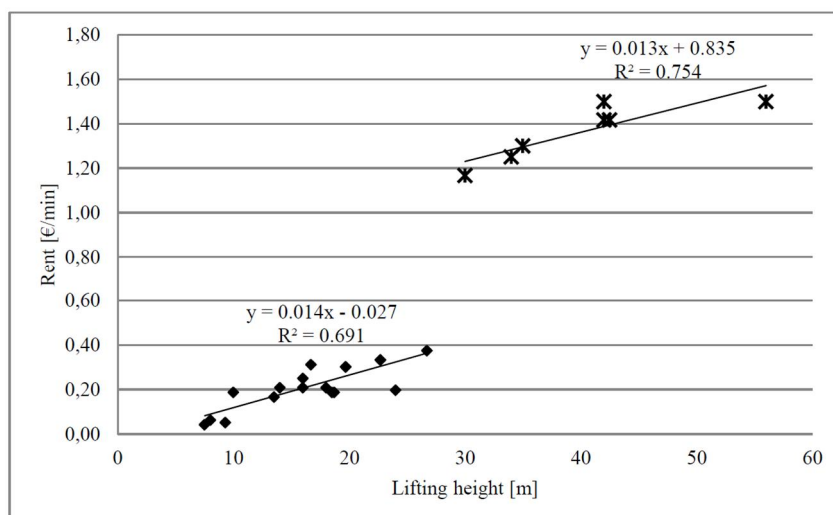
**Kuva 3.11** Nosturien vuokrauksen hinta nostokapasiteetista riippuen [4, kuva 45].

Kaava nostimen kustannuksista kun valitaan 80 tonnin nostin.

$$c_{EqE1} = 0,015 * x + 0,758 = 1,96 \text{ [€/min]} \quad (3.76)$$

### Henkilönostin

Henkilönostimen vuokran suuruus perustuu pääasiassa henkilökorin ulottuvuuteen korkeus suunnassa. Yleisesti henkilönostin pystytän viemään lähelle työpistettä ja siten korkeus on määräävä kriteeri henkilönostimen valinnassa. Tässä kohteessa asennetaan jo rakennetun yleisökatson katosta, joten on todennäköistä, että henkilönostin joudutaan jättämään kauas työpisteestä. Henkilönostimien nostokorkeus/kapasiteetti laskee jyrkästi, mikäli joudutaan kurottamaan vaakasuunnassa. On siis perusteltua varautua suuremman korkeuden omaavaan henkilönostimeen. Näissä laskelmissa oletetaan 30 metrin henkilönostinta. Tästä seuraa henkilönostimelle kustannuksiksi kaava 3.77. Kuvassa 3.12 on esitetty henkilönostimien vuokrahintoja korkeuden funktiona [4, kuva 47].



**Kuva 3.12** Henkilönostimien vuokraushinnat nostokorkeuden mukaan.

Kaava henkilönostimen kustannuksista kun valitaan 30 metrinen henkilönostin.

$$c_{EqE2} = 0,013 * x + 0,835 = 1,225 \text{ [€/min]} \quad (3.77)$$

Pulttien yksikköhinnat.

Liitosvaihtoehtojilla on suuret eroavaisuudet pulttien lukumäärässä ja ottaen huomioon kyseisten liitosten yleisyyden, on perusteltua huomioida myös pulttien kappalehinnat laskelmiin. Haapion väitöskirjassa ja siten tässäkin esitetyt hinnat ovat yksittäisten pulttien hintoja. Tähän kohteeseen menevien pulttien lukumäärät ovat kymmenissä tuhansissa. Samoja pultteja menee siis keskimäärin tuhansia ja muttereita lähes kymmenen tuhatta. Nämä arviot perustuvat projektin lähtöarvoon väsyttävästä kuormasta, yli kymmenen tuhannen profiilin liitostarpeesta, vähimmilläänkin liitoksessa on kaksi pulttia ja liitokset ovat suunniteltu tasalujiksi profiilien kanssa. Tämä tarkoittaa suuria lukumääriä pultteja per liitos. Kun samoja pulttikokoja tilataan tuhansissa ja samoja muttereita sekä aluslevyjä kymmenissä tuhansissa, on selvää että kyseiset hinnat ovat yksikköhinnaltaan paljon pienempiä kuin, mitä normaalille yksityisasiakkaalle maksaisi kymmenen pultin tilausena. Todellisia tukkuhintoja ei kuitenkaan ole saatavissa tähän laskentaan, joten pulttien kustannuksiin oletetaan tukkualennuskerroin 0,7. Taulukossa 3.5 on esitetty valikoidusti pulttien yksikköhintoja huomioiden tukkualennuskertoimen. Taulukossa 3.6 on tukkuhinnalla ostettujen muttereiden yksikköhintoja. Taulukossa 3.7 on tukkuhinnoilla ostettujen aluslevyjen yksikköhintoja [4]. Tässä kohteessa käytettävät pultit ovat väsymiskestäviä korkealujuuspultteja, joiden hinta on korkeampi kuin lähdemateriaalissa käytetyissä pulteissa. Tämä ero on arvioitu kustannuslaskennassa hinnankorotuskertoimella 1,4.

**Taulukko 3.5** DIN931, osakierteinen  
(8.8, kuumasinkitty) [4]

pituus [mm]	M20 €/kpl	M24 €/kpl	M30 €/kpl
65	1,01	N/A	N/A



70	1,13	N/A	N/A
75	1,19	2,07	N/A
80	1,25	2,11	N/A
90	1,37	2,32	4,89

**Taulukko 3.6** DIN934-8/10  
(8.8 kuumasinkityt) mutterit [4]

M20	M24	M30
€/kpl	€/kpl	€/kpl
0,38	0,69	1,49

**Taulukko 3.7** DIN 7989  
(kuumasinkityt aluslevyt) [4]

M20	M24	M30
€/kpl	€/kpl	€/kpl
0,38	0,69	1,49

Nämä kustannukset huomioituna, asennuksen vertailukustannuksiksi saadaan kaava 3.78.

$$C_E = (0,5 * n_{bj} - 0,42) * (2,6 + 0,5 + 1,96 + 1,225) + c_{EP} \text{ [€]} \quad (3.78)$$

→

$$C_E = (0,5 * n_{bj} - 0,42) * (6,285) + n_{bj} (c_{bBj} + c_{bNj} + 2 * c_{bWj}) \text{ [€]} \quad (3.78)$$

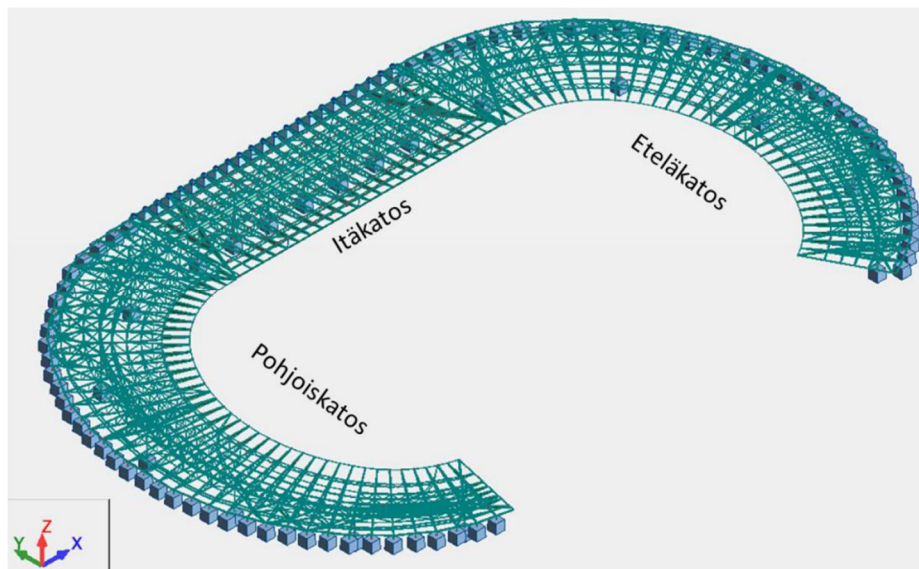
missä

$c_{bBj}$	Koon j pultin yksikköhinta [€/kpl]
$c_{bNj}$	Koon j mutterin yksikköhinta [€/kpl]
$c_{bWj}$	Koon j aluslevyn yksikköhinta [€/kpl]

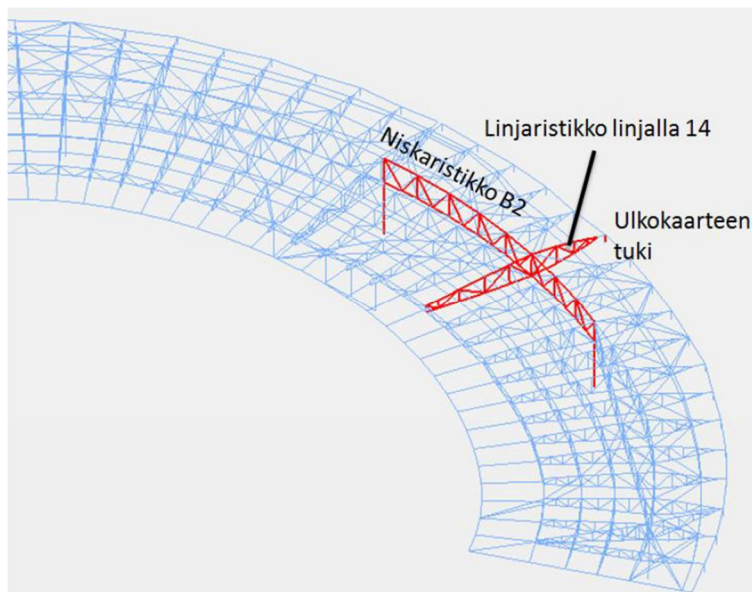
## 4. MITOITUSKOHTEN ESITTELY

### 4.1 Tutkimuskohde yleisesti

Tämän diplomityön kohteena on Helsingin Olympiastadionin perusparannuksen yhteydessä tehtävän teräsrakenteisen yleisökatsomon linjaristikon ja niskaristikon liitosvaihtoehtojen kustannusvertailua. Tutkittavina oleva liitosvaihtoehto on esitelty kappaleissa 4.3 ja 4.4. Liitosvaihtoehtoja koskevat kohteen tekniset ehdot ja rajoitukset ovat esitelty kappaleessa 4.2. Kuvassa 4.1 on esitelty uusien katosten sauvarakenne [18 kuva 3.6] ja kuvassa 4.2 on esitelty tarkasteltava kohta katoksen rakenteesta [18 kuva 3.1].



**Kuva 4.1** Uusien teräsrakenteisten yleisökatosten sauvarakenne [18 kuva 3.6]



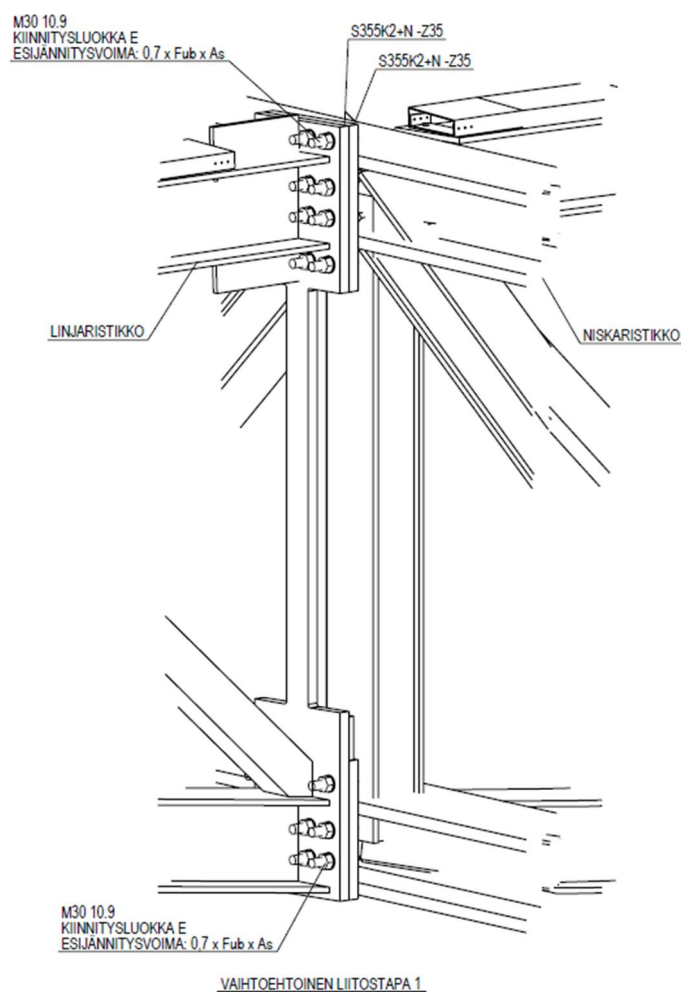
**Kuva 4.2** Tutkittavan liitoskohdan sijainti katoksessa [18, kuva 3.1]

## 4.2 Kohteen tekniset tiedot

Katoksien teräsrakenteiden suunnittelua ohjaavina dokumentteina ovat teräsrakenteiden toteutuseritelmä [11], suunnittelun periaatteet [12] ja liitosten periaatedetailjit [13]. Näistä dokumenteista selviää tässä diplomityössä tutkittavien liitosvaihtoehtojen periaatteet, käytetyt materiaalit ja standardit.

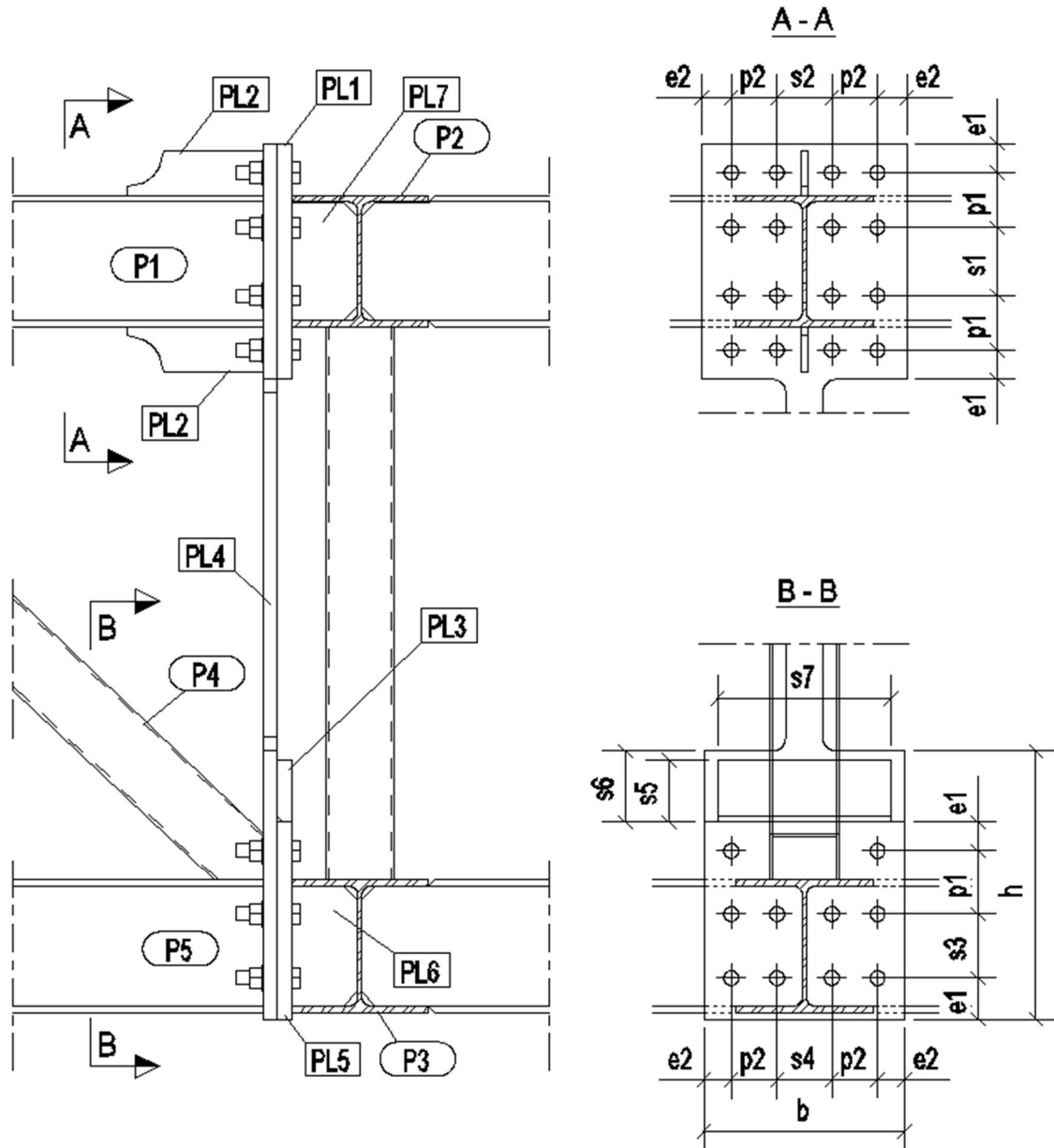
## 4.3 Liitosvaihtoehto 1: Leikkauspalaliitos

Tässä yhteydessä leikkauspalaliitoksella tarkoitetaan kuvassa 4.3 esitettyä liitosta. Se on ensimmäisenä vaihtoehtona niska-linjaristikon liitokseksi [13 det4]. Ullokkeena toimivan linjaristikon ensimmäiseltä diagonaalilta tuleva pystykuorma välitetään niskaristikolle kuvassa 4.4 esitetyn PL3:sen välityksellä. Leikkauspala PL3 on hitsattu ympäriinsä, mutta vain sen pystyhitsit huomioidaan pystykuormaa välittäväksi. Tuulikuorma aiheuttaa vaihtelevaa kuormitusta koko linjaristikon ulokkeelle, joten paarteiden ja diagonaaliliitokset mitoitetaan kestäämään vetoa ja puristusta. Ristikon yksittäisten profiilien vääntökuormitus oletetaan vähäiseksi ja koko ulokkeen vääntö huomioidaan paarteiden vaakavoimaparina. Liitoksen tarkempi laskennallinen esittely on kappaleessa 5.1.1.



**Kuva 4.3** Leikkauspalaliitos [13 det 4]

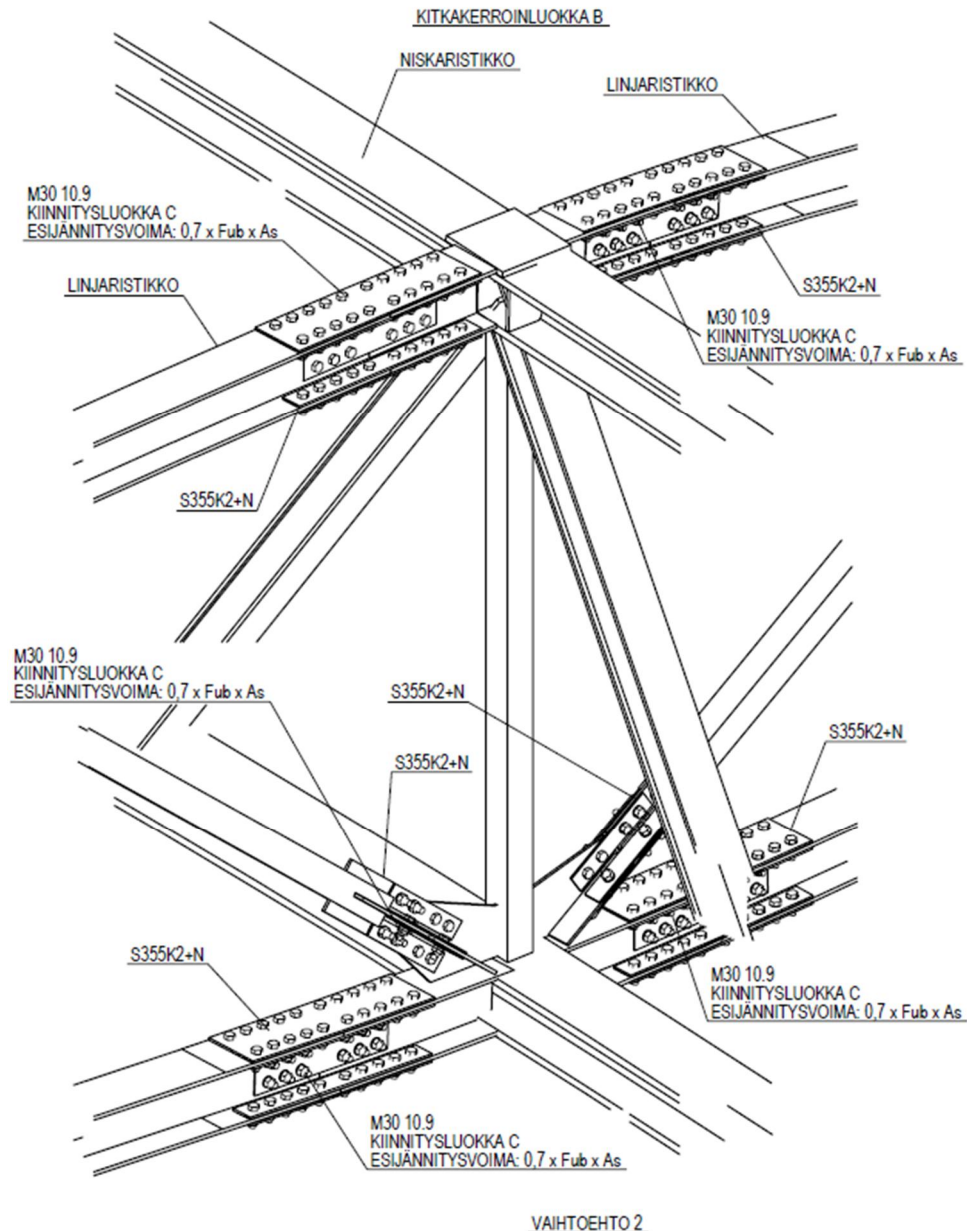
Kuvan 4.4 merkinnöissä numeroitu P tarkoittaa profiilia, PL levyä ja muut merkinnät ovat ruuvien keskiö-, ja reunaetäisyyksiä. Kiinnikkeiden etäisyyksin parametrisointia on käsitelty kappaleessa 5.1.1. Linjaristikon paarteet ovat todellisuudessa kaarevat kuin lentokoneen siipi. Tämä kaarevuus on suoritettu kuvatasolla kuvien havainnollistavuuden parantamiseksi. Paarteiden todellinen kaarevuus ei aiheuta merkittäviä muutoksia tämän liitostyyppin lujuuslaskentaan, joten sen vaikutuksen on jätetty huomioimatta.



**Kuva 4.4** Leikkauspalaliitos kuvattuna sivusta sekä leikkaukset A-A ja B-B

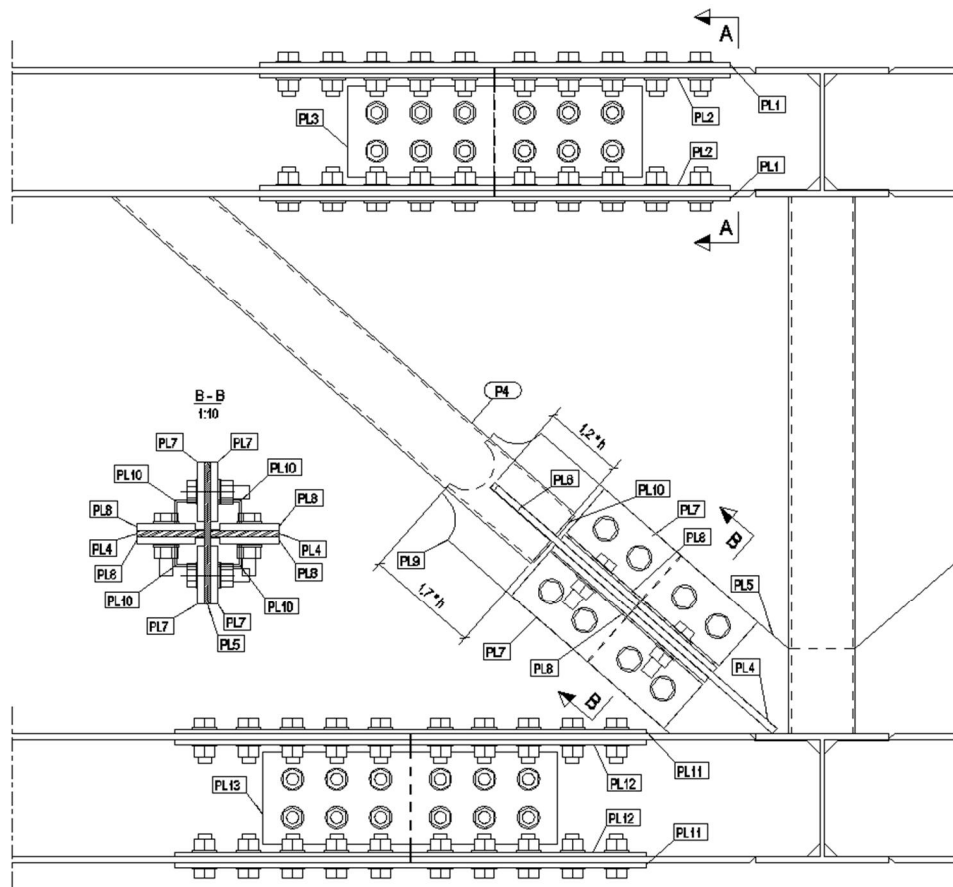
#### 4.4 Liitosvaihtoehto 2: Universaaliliitos

Universaaliliitos nimikettä käytetään kuvassa 4.5 [13 det 14] näkyvien paarteiden jatkamisesta. Tässä yhteydessä universaaliliitoksella tarkoitetaan koko liitosvaihtoehtoa diagonaaliliitos huomioiden. Kuten kuvasta 4.5 on havaittavissa, linjaristikon uloke on kaarevalla profiililla. Rakenne on suoristettu kuva tasolla havainnollisuuden parantamiseksi. Laskennallisesti profiilien kaarevuus on otettu huomioon kasvatettujen nurjahduskäyrien ja nurjahduspituuksien kautta (vrt. kappale 5.2.1).



**Kuva 4.5** Liitosvaihtoehto 2 [13 det 14]

Kuvassa 4.6 on esitetty universaaliliitos sivusta sekä diagonaalin B-B leikkaus. Kuvassa numeroidut P merkinnät tarkoittavat laskennassa tutkittavaa profiilia ja numeroitu PL tarkoittaa levyä samaisella tunnuksella laskennassa.



**Kuva 4.6** Liitosvaihtoehto 2 osanumeroituna.

Väsyttävän kuorman rasittamana, liitokset on suunniteltu liukumisen kestävään kiinnitysluokkaan C (vrt. kappale 2.3.2 ruuvien kiinnitysluokat). Erityisesti diagonaalin liitos on suunniteltu väsymisen vaikutukset huomioon ottaen. Profiilin siirtyminen liitoslevyihin on tehty kaarevalla muotoilulla sulavaksi, äkkinäisen jäykkyyden ja siten vahvan jännityspiikin tasaamiseksi. Rakenteen hitsiliitokset on mahdollisuuksien mukaan joko hiottu tasalle tai hiottu rajapinnoistaan kappaleen 2.4.2 hitsiliitosten väsymissuunnittelun mukaisesti. Profiilien P1 ja P7 liittyminen hitsaamalla profiileihin P3 ja P6 on huomioitu kuvan 2.10 mukaan. Laipat hitsataan puoli V hitsillä tasalujaksi ja uuma pienellä molemmiin puolin.

## 5. LASKENNALLINEN TARKASTELU

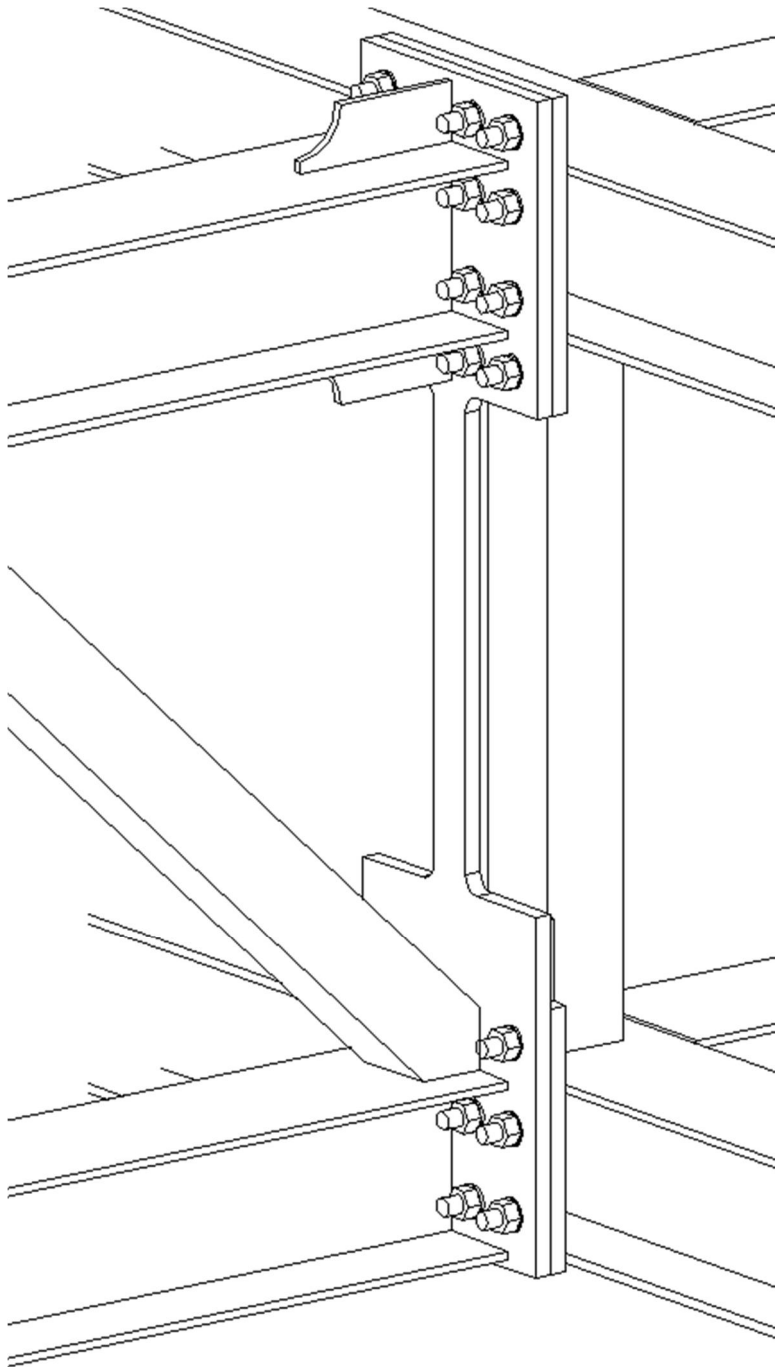
Tässä kappaleessa käydään läpi tämän työn laajuuteen kuuluvien liitosvaihtoehtojen yleisiä periaatteita, laskentatyökalun geometrista automatiikka, lujuus-, ja kustannuslaskentaa sekä liitosten väsymiskestävyyden arviointia. Yleisillä periaatteilla tarkoitetaan mitä asioita on huomioitava liitosta suunnittelussa. Tämän työn laajuudessa parametrisella geometrialla tarkoitetaan liitoksen mitoitus työkalun toteuttamaa automaattista geometrian määrittystä levyille ja pulteille liittyvien profiilien mukaan. Lujuus-, ja kustannuslaskenta kappaleissa on esitetty esimerkkilaskemat laskentatyökalusta käytettäessä samoja rasiituksia ja profiileita kummallekin liitosvaihtoehdolle. Väsymiskestävyyden arviointi kappaleissa pohditaan liitosvaihtoehdon rakenteellisten ratkaisujen toimivuutta väsyttävässä rasiituksessa.

### **Yleiset periaatteet**

Liitosten suunnittelua ohjaa standardien lisäksi käytännöllisyys ja projektikohtaiset lisäehdot. Projekteihin on yleensä valittu liitosten levyille suositeltavat paksuudet, joiden rajoissa liitosta voi muokata. Yleisenä käytäntönä on valita voimaliitoslevyn paksuudeksi vähintään 10 mm, vaikka ohuempi laskennallisesti olisi todettu sopivaksi. Sekundäärisiin rakenteisiin, kuten tulppalevyihin ja lähes ilman rasiitusta oleviin jäykistelevyihin, voidaan käyttää 5 mm paksuista levyä. Hitsauksia suunnitellessa väsyttävässä kuormituksessa on arvioitava rakenteen hitsattavuus, hitsin viimeistely sekä levyjen valssisuunta. Hitsattavuutta parantavilla ratkaisuilla helpotetaan sekä hitsaustyötä sekä työn tarkistusta. Hitsin viimeistely on olennaista väsyttävässä kuormituksessa (vrt. kappale 2.4.2). Tämä voi vaatia normaalia suurempaa työtilaa. Levyjen valssisuunta vaikuttaa rakenteen väsymiskestävyyteen (vrt. kuva 2.13). Ruuvien tyyppi (EN14399-1) sekä lujuus (10.9) ovat ennalta valittuja. Ruuvien valintamahdollisuudet ovat, standardin suositusten rajoissa, ruuvien koossa. Tavanomaisessa suunnittelussa, runkoa kannattelevien voimaliitosten pienin sallittu ruuvikoko on M16. Tässä työssä tutkittavissa väsytySKUORMITETUissa liitoksissa on tavoitteena käyttää mahdollisimman isoja ruuveja (M24-M30). Isot ruuvit mahdollistavat suuren poikkipinta-alan ja näin suuren kapasiteetin väsyttävän kuormituksen jännitysvaihteluihin. Projektin yksityiskohtaiset ehdot teräsrakenteiden suunnittelulle, valmistukselle ja asennukselle on esitetty projektin toteutuseritelmässä. Kokoonpanojen asennettavuutta pyritään parantamaan liitoksen suunnittelulla. Asennettavuuden parantavat rakenneratkaisut eivät kuitenkaan saa heikentää liitoksen väsymisluokkaa.

## 5.1 Liitosvaihtoehto 1: Leikkauspalaliitos

Tutkittava liitos on esitelty yleisellä tasolla kappaleessa 4.3. Leikkauspalaliitos kiinnittää linjaristikon ulokeosan niskaristikkaan korkealujuuspulteilla esijännitetyssä kiinnitysluokassa-E. Paarteiden laippalevyt ovat samaa levyä (PL4) asennustoleranssin parantamiseksi. Ristikon diagonaali on hitsattu sekä alapaarteeseen että liitoslevyyn. Liitos on esitetty kuvassa 5.1.

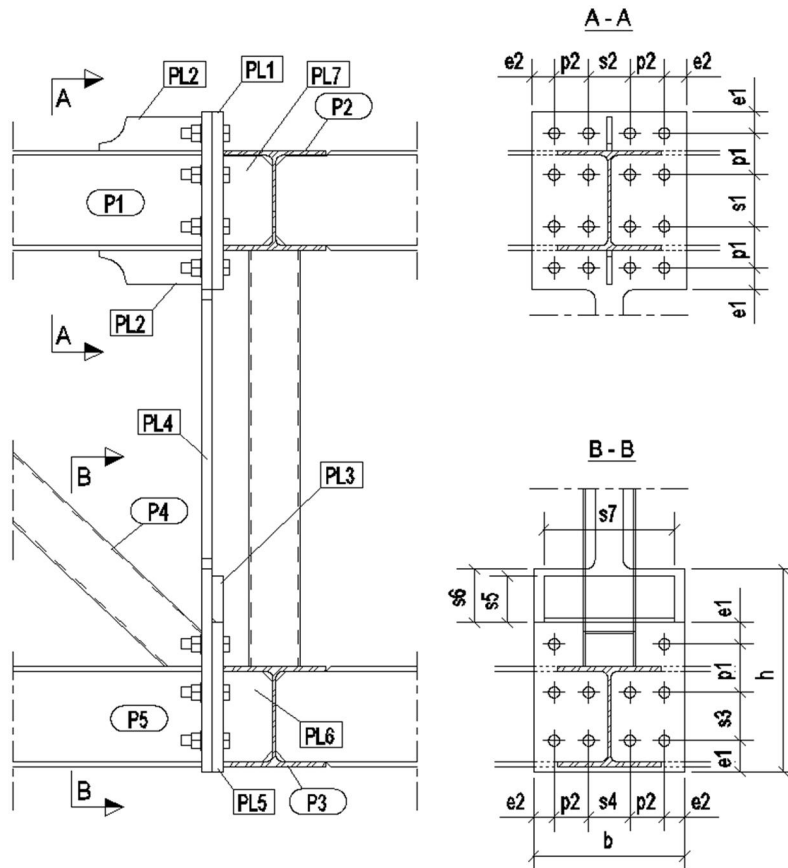


**Kuva 5.1** Liitosvaihtoehto 1 [Leikkauspalaliitos].

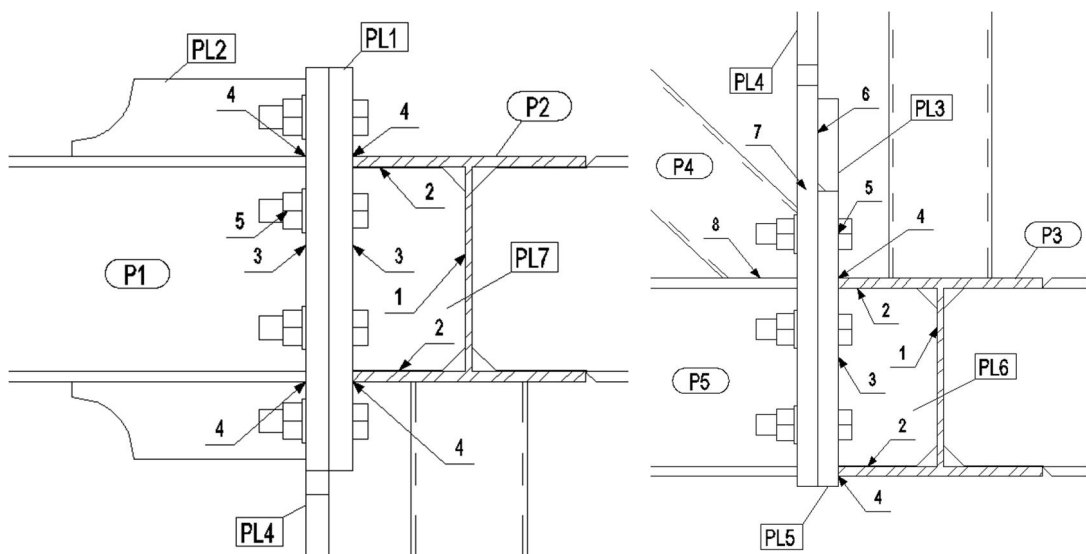


### 5.1.1 Leikkauspalaliitoksen lujuuslaskenta

Tässä kappaleessa on lyhennetty koonti leikkauspalaliitoksen lujuusmitoituksesta. Lujuuslaskenta on esitetty kokonaisuudessaan A-liitteessä. Kuvassa 5.2 on näytetty liitoksen profiili- ja levytunnukset. Kuvassa 5.3 on detaljit leikkauspalaliitoksesta liitoksesta. Kuvassa näkyy profiili-, ja levytunnukset sekä tutkittavat kohdat numeroituna.



**Kuva 5.2** Leikkauspalaliitoksen tunnukset



**Kuva 5.3** Leikkauspalaliitoksen detaljit tunnuksilla.

Yläpaarteen liitoksesta on mitoitettu jäykistelevyn hitsit (1) ja (2) ovat mitoitettu paarteen vedolle. Hitsi (3) kannattelee sekä yläpaarteen tukivoimaa uuman suuntaisena leikausvoimana sekä ottaa vastaan paarteen vetoa. Hitsi (4) hoitaa linjaristikon sivusuuntaisen kuorman sekä osallistuu hitsi (3):n kanssa paarteen vedon välittämiseen. Pultit (5) on mitoitettu paarteen vedolle, leikkaukselle, niiden yhdistelmälle, liukumiskestävyydelle, reu-  
napuristukselle, pultin/mutterin lävistymiselle sekä levyn taipumiselle. Levyt PL1 ja PL4 oletetaan tässä yhteydessä yhtä paksuiksi. Jos jäykistelevyt PL2 jätetään huomioimatta, saadaan samat arvot kummallekin levyn taipumislaskennasta. Laskennan lähtöarvot on esitetty taulukoissa 5.1 (profiilit), 5.2 (kiinnikkeet), 5.3 (levyt) ja tulosten yhteenveto taulukossa 5.2. Taulukon 5.3 levyjen tunnusten selvennykset ovat havainnollistettu kuvassa 5.4.

**Taulukko 5.1** Liitosvaihtoehto 1:n profiilit

PROFIILIT									
Tunnus	Profiili	h	b	t <sub>w</sub>	t <sub>f</sub>	r	A	h <sub>i</sub>	d
-	-	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm <sup>2</sup> ]	[ mm ]	[ mm ]
P1	HEA300	290	300	8,5	14	27	11250	262	208
P2	HEA300	290	300	8,5	14	27	11250	262	208
P3	HEA300	290	300	8,5	14	27	11250	262	208
P4	CFRHS 180x180x6	180	180	12,5	12,5	37,5	7704	155	105
P5	HEA300	290	300	8,5	14	27	11250	262	208

MATERIAALIT		
tunnus	osa	teräslaji
P1	YLÄPAARRE	S355
P2	NISKARISTIKKO-YP	S355
P3	NISKARISTIKKO-AP	S355
P4	DIAGONAALI	S355
P5	ALAPAARRE	S355
PL	LEVYT	S355

Profiilin mittojen selitykset.

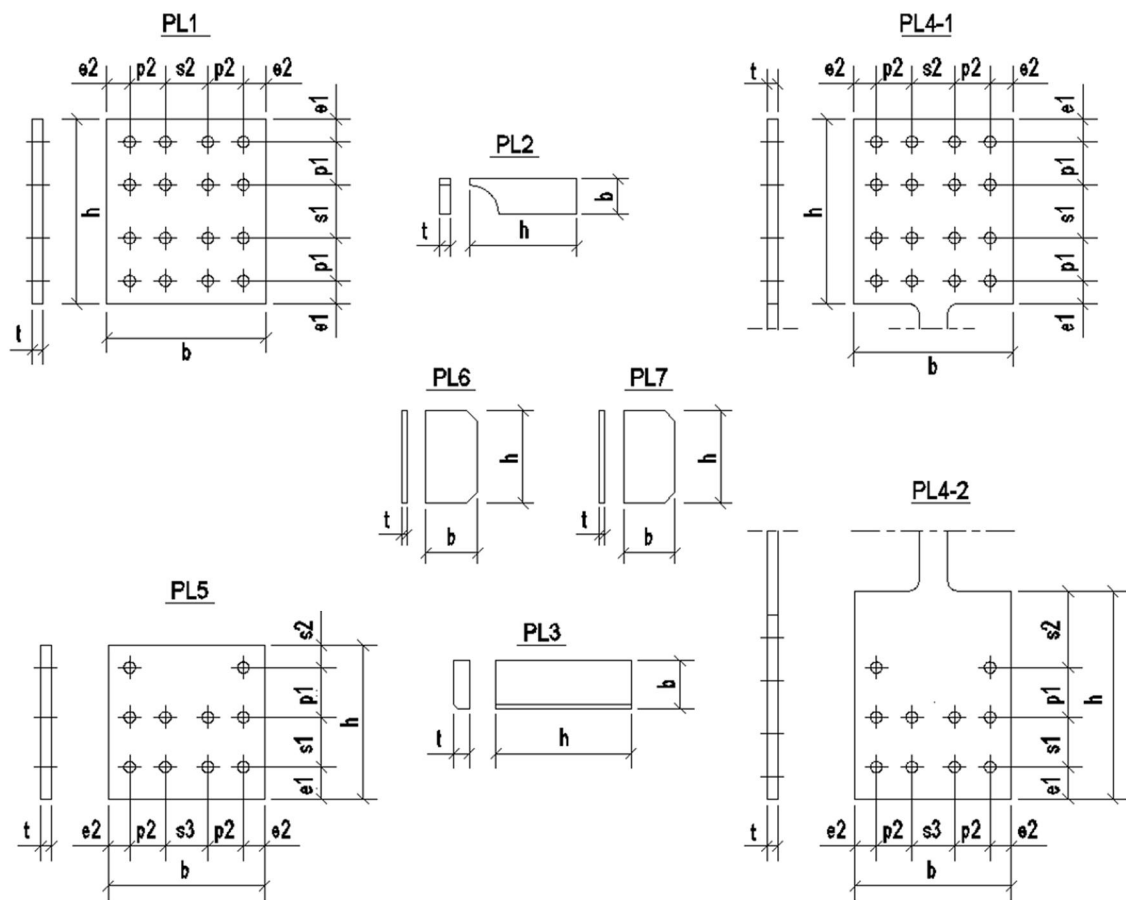
**Taulukko 5.2** Liitosvaihtoehto 1:n kiinnikkeet

Kiinnityskohta	koko	EN ISO	lujuus	d	d <sub>0</sub>
YLÄPAARRE	M30	4014	10,9	30	33
ALAPAARRE	M24	4014	10,9	24	26

**Taulukko 5.3** Liitosvaihtoehto 1:n levyt

[mm]	PL1	PL2	PL3	PL4-1	PL4-2	PL5	PL6	PL7
e1	64	0	0	64	90	90	0	0
p1	120	0	0	120	140	140	0	0
e2	64	0	0	64	60	60	0	0
p2	100	0	0	100	100	100	0	0
s1	150	0	0	150	140	140	0	0
s2	120	0	0	120	218	63	0	0
s3	0	0	0	0	120	120	0	0
b	448	300	135	448	440	440	145	145
h	518	100	380	518	588	433	260	260
t	20	15	30	20	30	20	10	10

Taulukko 5.3:n tunnuksset on selvennyt kuvassa 5.4.

**Kuva 5.4** Liitosvaihtoehto 1: liitoslevyjen tunnuksset

**Taulukko 5.4** Liitosvaihtoehto 1:n tulokset

## YLÄPAARTEEN LASKENNAN TULOKSET

## YLÄPAARTEEN KESTÄVYYKSIEN YHTEENVETO

Mitoituskohta	Rasitus	Kestävyys	yksikkö	käyttöaste		
Profiilin jännitykset	350,3	355	N/mm <sup>2</sup>	0,99	OK	(a)
Hitsit (3+4) veto	1800	3969	kN	0,45	OK	(1,2,3,4)
Liukumiskestävyys	195	1257	kN	0,16	OK	(5.1)
Pulttien Veto	1800	4039	kN	0,45	OK	(5.2)
Ruuvien lävistäminen	1800	3999	kN	0,45	OK	(5.3 & 5.4)
Pulttien leikkauskestävyys	195,3	2244,0	kN	0,09	OK	(5.5)
Pulttien yhteisvaikutus	-	-	kN	0,41	OK	(5.6)
Pulttien redusoitu vetok.	1800	4039,2	kN	0,45	OK	(5.7)
Reunapuristuskestävyys	1800	3956,4	kN	0,45	OK	(5.8 & 5.9)
Levyn taipuminen	113	159,0	kN	0,71	OK	
Suurin käyttöaste				0,99		

## ALAPAARTEEN LASKENNAN TULOKSET

## ALAPAARTEEN KESTÄVYYKSIEN YHTEENVETO

Mitoituskohta	Rasitus	Kestävyys	yksikkö	käyttöaste		
Profiilin jännitykset	350,3	355	N/mm <sup>2</sup>	0,99	OK	(a)
Hitsit (1+2+3+4) veto	1800	3969	kN	0,45	OK	(1,2,3,4)
Liukumiskestävyys	271	791	kN	0,34	OK	(5.1)
Pulttien Veto	1800	2542	kN	0,71	OK	(5.2)
Ruuvien lävistäminen	1800	5076	kN	0,35	OK	(5.3 & 5.4)
Pulttien leikkauskestävyys	270,6	3590,4	kN	0,08	OK	(5.5)
Pulttien yhteisvaikutus	-	-	kN	0,58	OK	(5.6)
Pulttien redusoitu vetok.	1800	2541,6	kN	0,71	OK	(5.7)
Reunapuristuskestävyys	1800	6330,2	kN	0,28	OK	(5.8 & 5.9)
Levyn taipuminen	113	152,7	kN	0,74	OK	
Suurin käyttöaste				0,99		

**5.1.2 Leikkauspalaliitoksen kustannuslaskenta**

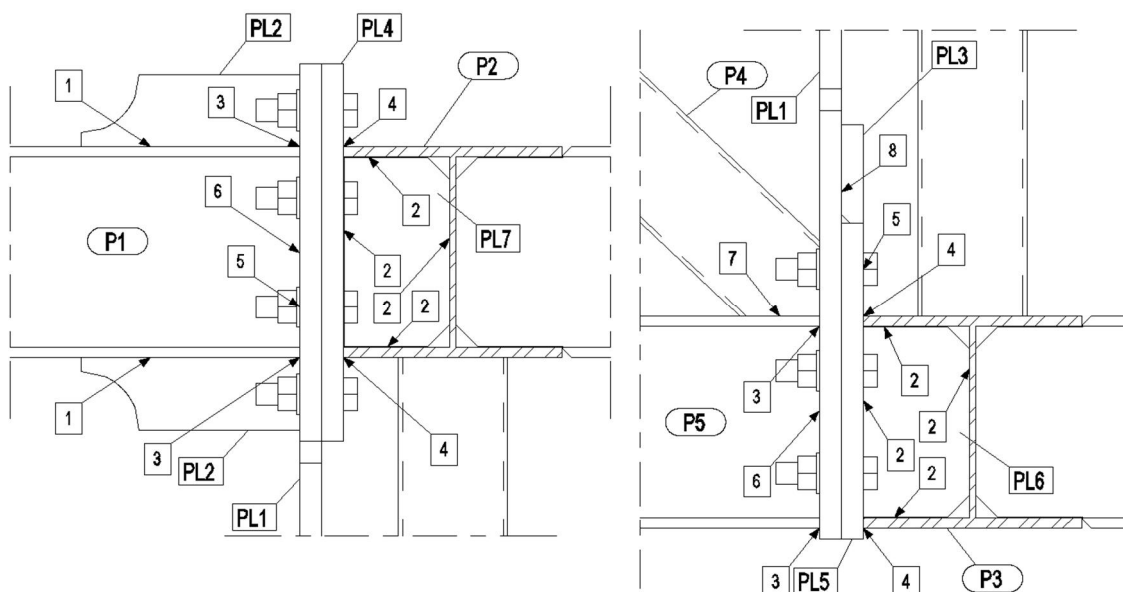
Tässä kappaleessa on esitetty leikkauspalaliitoksen kustannukset lyhennetysti. Liitoksen kustannuslaskenta on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä B. Kustannukset koostuvat pääosin levyjen valmistuksesta (materiaali, puhdistus ja rei'itys). Lähtötiedot osille ovat samat kuin niiden mitoituksellekin (vrt. kappale 5.1.1). Kustannusten yhteenveto on esitetty taulukossa 5.5.

**Taulukko 5.5** Liitosvaihtoehto 1:n kustannusten yhteenveto

DET4. LEIKKAUSPALALIITOKSEN KUSTANNUSTEN YHTEENVETO		
$C_{SM}$	387,56 €	Levyn materiaalien kustannus
$C_B$	0,42 €	Levyjen suihkupuhdistuksen kustannukset
$C_{CU}$	39,67 €	Levyjen leikkauskustannukset
$C_D$	49,71 €	Poraus (vain levyissä on reikiä)
$C_{SM}$	47,78 €	Profiilin sahaus
$C_{CO}$	0,00 €	Profiilin loveus (ei ole lovia)
$C_{PA}$	154,59 €	Kokoonpano
$C_{PT}$	44,18 €	Jälkikäsittelyt ja tarkastukset
$C_P$	17,13 €	Maalaus kustannukset (vain levyjen maalaus)
$C_T$	0,00 €	Kuljetuskustannukset (ei huomioida liitosvertailussa)
$C_E$	398,48 €	Asennuskustannukset (sis. Kiinnikkeiden hinnat)
<b><math>C_T</math></b>	<b>1139,52 €</b>	<b>Liitoksen kustannusvaikutukset</b>

### 5.1.3 Leikkauspalaliitoksen väsymiskestävyyden arviointi

Leikkauspalaliitoksen väsymisluokkaa ja kestävyyttä ei todettu laskennallisesti tässä diplomityössä. Liitoksen väsymisrasitusten mahdollisuuksia, väsymiskestävyyden parantavia rakennratkaisuja ja väsymisluokkaa on arvioitu teräsrakenteiden väsymiseen opastavan standardin EN 1993-1-9 esimerkkitaulukoiden sekä Henri Hautamäen diplomityön esittämän teräksen väsymisen yleisen teorian avulla [8, 17]. Kuvassa 5.5 on esitetty leikkauspalaliitoksen väsymisen kannalta olennaisia tarkastelukohtia numeroituna.

**Kuva 5.5** Leikkauspalaliitoksen väsymistarkastelupisteet numeroituna

Liitokseen on valittu korkean lujuuden ruuvit (10.9) E-kiinnitysluokassa. Esijännitettyinä, ruuvit pienentävät tyypillisiä väsymismurtumia mutterin ja ensimmäisten kierteiden kohdalta [17, s. 12] ja samalla parantaen liitettävien perusmateriaalien väsymiskestävyyttä ruuviliitoksessa [17, s. 13]. Levyjen pienahitsauksille on edellytetty 0,5...1 mm railoitukset kuvan 2.12 mukaisesti. Railoitus poistaa hitsin ja perusmateriaalin rajapintaan tulevia alkusäröjä. Liitoslevyn ja profiilin välinen hitsaus on kohtisuoraan levyn valssi-suuntaan ja paarteessa ilmenee vetoa. Tämä yhdistelmä voi altistaa lamellirepeilylle [9 kappale 5.3]. Lamellirepeilyn riskiä pienennetään rajoittamalla käytettyjen liitoslevyjen materiaalin lujuutta paksuuden kasvaessa yli 40 mm sekä vaatimalla laajaa NDT tarkastusta. NDT tarkastus voi havaita mahdolliset valmistukselliset rakennevirheet levyissä ja hitseissä. Kantava rakenne on teräsrakenteiden osalta toteutusluokassa EXC3 [11 kappale 4.1.2]. Tämä asettaa hitsausluokaksi B [2 kappale 7.6]. Toteutusluokan EXC3 mukaiset vähimmäistarkastukset on esitetty taulukossa 2.17. Yläpaarteeseen lisätyt levyt on muotoiltu, jotta välttyttäisiin äkilliseltä jäykkyyden muutokselta. Tällä tavalla pienennetään väsyttävän kuormituksen aiheuttamia jännityspiikkejä hitsiliitokselle.

### **Liitoksen väsymislukokan arviointi.**

#### **1. Väsymislukokka: 80**

Päätylevyä PL1 jäykistävä levy PL2 on pienahitsattu ympäri profiilin P1 pituussuuntaan. Pienahitsi pitää olla vahvistettu eli täydellä tunkeumalla vähintään levyn pyöristykseen verran ja pyöristys on oltava enemmän kuin 150 mm. Pyöristys säde on valmistettu ensiksi levyleikkauksessa plasma-, tai polttoleikkauksena ja hitsauksen jälkeen hiomalla hitsipinta levyn pinnan tasoon yhden suuntaiseksi profiilin kanssa. Poikittaishitsin rajaviiva poistetaan kokonaan [8 taulukko 8.4 tapaus 3].

#### **2. Väsymislukokka: 80**

Profiilin P2 uuman ja laipan jäykistelevynä sekä PL4:sen leikkausvoiman välittävänä levynä, PL7 on pienahitsattu ympäri. Vastaava tilanne on profiilin P3 jäykistävässä levyssä PL6. Hitsien päät hiotaan huolellisesti reunahaavan poistamiseksi. Väsymislukokan 80 rajoituksena levyn PL7 pienahitsien yhteisen z-mitan ja levyn PL7 paksuuden yhteismitan enimmäisarvo on 50 mm [8 taulukko 8.4 tapaus 7].

#### **3. Väsymislukokka 80**

Profiili P1 liittyy päätylevyyn PL1 laipoistaan puoli V hitsauksella. Levyn paksuuden ja hitsin z-mitan yhteismitan enimmäisarvo on 50 mm [8 taulukko 8.5 tapaus 1]. Hitsaus on tarkistettava mahdollisten epäjatkuvuuksien ja sovitusrakenteiden varalta, jotka eivät täytä standardin EN 1090 mukaisia vaatimuksia [2]. Vastaava tilanne on profiilin P5 ja levyn PL1:sen välillä.

4. Väsymisluokka 40

Liitoslevy PL4 liittyy profiiliin P2 vaihtoehtoisesti molemminpuolisella pienalla tai puoli V-hitsauksella [8 taulukko 8.4 tapaus 5]. Väsymisluokkaa ei pysty parantamaan levymuokkauksilla. Kasvattamalla profiilin P2 laippojen poikkipinta-alaa, voidaan pienentää jännityksiä ja siten väsyttävää rasitusta. Tämä ei kuitenkaan paranna liitoksen väsymisluokkaa. Ylimoitettuna, se on pienemmän jännityksen alaisena, vähemmän altis väsymisvauriolle.

5. Väsymisluokka 71 (arvioitu)

Kiinnityksissä käytetään osakierteisiä (EN14399-1), korkealujuuden (10.9), esijännitettyjä (kiinnitysluokka E) ruuveja. EN 1993-1-9 taulukossa 8.1 ilmoitetaan ruuveille yleisesti väsymisluokaksi 50. Lisätarkennuksena siinä mainitaan esijännitettyjen ruuvien tapauksessa jännitysvaihteluvälin pienentämismahdollisuuden. Tähän yhdistäen saman taulukon tapauksen 10, jossa profiilin laippaan on kiinnitetty levy yksileikkeisesti esijännitetyillä korkealujuusruuveilla, annetaan väsymisluokaksi 90. Näistä arvioiden on saatu väsymisluokaksi 71.

6. Väsymisluokka: 80 (yläpaarre),  
71 (alapaarre) (arvioitu)

Profiilin P1 uuma liitetään levyyn PL1 molemmin puolisella pienahitsillä. Hitsien juuret hiotaan kuvan 2.12 mukaisesti alkusäröjen vähentämiseksi. Yläpaarten tapauksessa suurin voimavaihtelu on aksiaalista, jolloin EN 1993-1-9 taulukon 8.5 tapaus 1 soveltuu parhaiten väsymisluokan arviointiin. Väsymisluokan 80 reunaehdoksi on asetettu uuman paksuuden ja sen molemmin puolisen pienahitsin z-mittojen summan maksimiarvoksi 50 mm. On oletettavaa että tämä ehto toteutuu kaikissa profiilivaihtoehdoissa. Profiilin P5 uuman ja levyn PL1 liitoksessa vaikuttaa aksiaalisen voiman lisäksi leikkausvoimaa. On siis perusteltua heikentää liitoksen oletettua väsymisluokkaa kaksi akselisessa kuormituksessa. [8, taulukko 8.5 tapaus 1].

7. Väsymisluokka: 56

Ristikon diagonaali P4 liittyy alapaarten profiilin P5 ylälaippaan sekä levyyn PL1 ympärihitsatulla pienahitsillä. Hitsin juuret hiotaan kuvan 2.12 mukaisesti alkusäröjen vähentämiseksi. Diagonaali välittää merkittävää aksiaalista voimaa. Mikäli diagonaalin seinämät ajatellaan erillisinä levyinä, standardin EN 1993-1-9 taulukon 8.4 tapaus 1 antaa varmalle puolelle väsymisluokaksi 56.

8. Väsymisluokka: 56 (arvioitu)

Leikkauspala PL3 kiinnittyy levyyn PL1 kolmelta sivultaan pienahitsillä ja yhdeltä sivulta joko koveraksi jätetyllä tai tasalle hiotulla puoli V hitsillä. Lähtöolettamuksena mitoituksessa on kantaa ristikon tukireaktiot leikkauspalalla ja liitos-

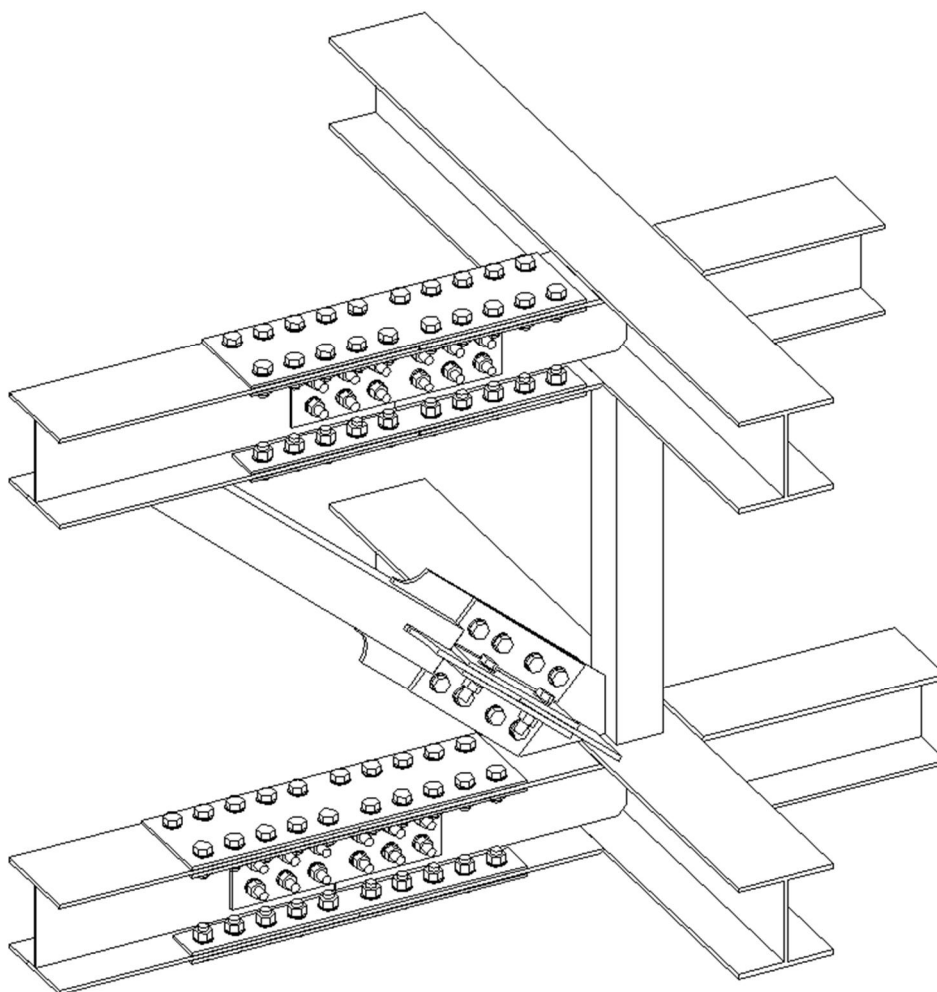
levyjen välisellä kitkaliitoksella. Mikäli leikkauspalan kantavat pystyhitsit murtaisivatkin, ristikko pysyy ruuvien murtorajassa liukumisen kestävässä liitoksessa. Liitoksen väsymisluokkaa on arvioitu EN 1993-1-9 taulukon 8.4 tapauksen 1 mukaan. Leikkauspalan on oletettu olevan yli 100 mm korkea joten tämä ehto antaa väsymisluokaksi 56.

### **Leikkauspalaliitoksen väsymisluokan arvioinnin tulokset.**

Liitoksen väsymisluokka: 40 (rakenteellisesti ei ole parannettavissa)

## **5.2 Liitosvaihtoehto 2: Universaaliliitos**

Tutkittava liitos on esitelty yleisellä tasolla kappaleessa 4.4. Universaaliliitos kiinnittää linjaristikon ulokeosan linjaristikkoon pulteilla esijännitetyssä kiinnitysluokassa E. Pariteiden laippa-, ja uumalevyt ovat samaa levyä asennustoleranssin parantamiseksi. Ristikon diagonaali on hitsattu sekä alapaarteeseen että liitoslevyyn. Liitosvaihtoehto on esitetty kuvassa 5.6.

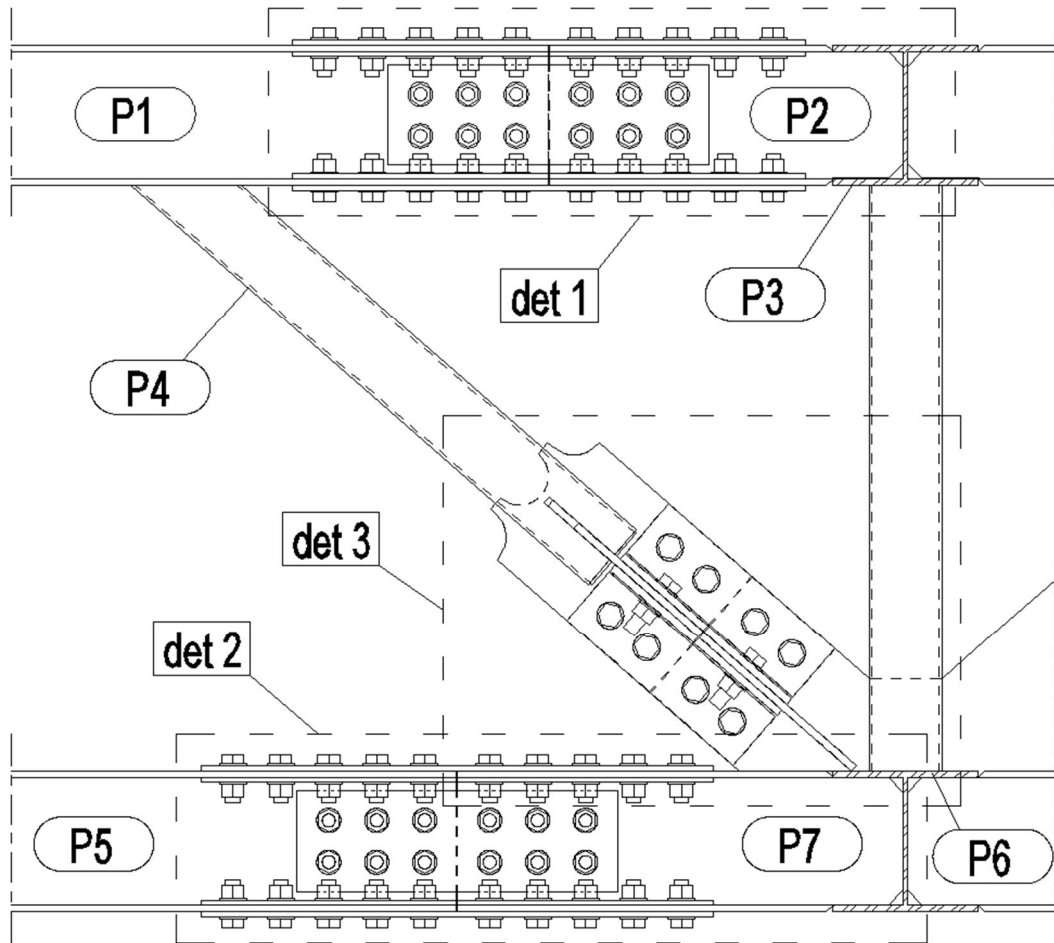


**Kuva 5.6** Liitosvaihtoehto 2.

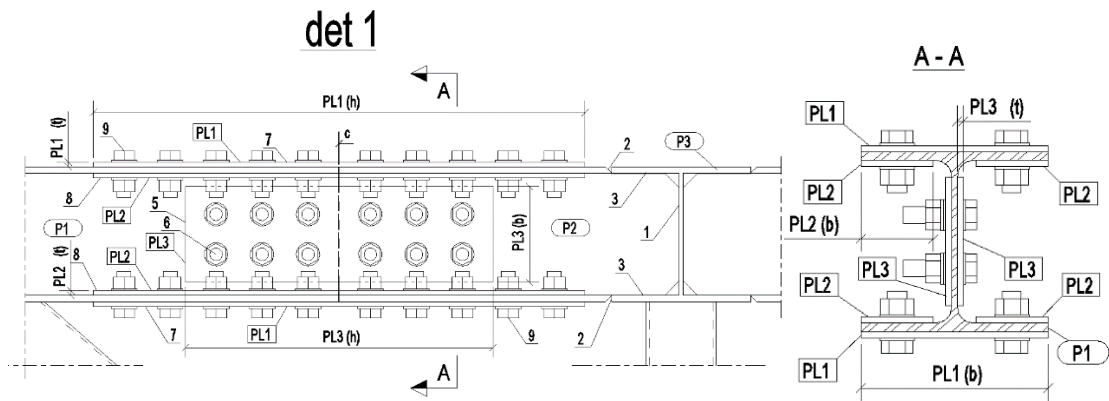


### 5.2.1 Universaaliliitoksen lujuuslaskenta

Tässä kappaleessa on lyhennetty koonti universaaliliitoksen lujuusmitoituksesta. Profiileina on käytetty samoja kuin kappaleessa 5.1.1 leikkauspalaliitoksen lujuusmitoituksessa. Laskenta on esitetty kokonaisuudessaan C liitteessä. Kuvassa 5.7 on näytetty universaaliliitoksen profiilitunnukset sekä detaljien numerointi. Kuvassa 5.8 on detalji ja leikkaus yläpaarteen liitoksesta. Kuvassa näkyy profiili-, ja levytunnukset, tutkittavat kohdat numeroituna sekä osien mitoituksen tunnukset.



**Kuva 5.7** Universaaliliitoksen profiilien tunnukset ja detaljien numerointi.



**Kuva 5.8** Liitoksen yläpaarteen detalji ja leikkaus A-A tunnuksineen

Hitsaukset (1), (2) ja (3) on mitoitettu vetoa vastaan. Hitsit (1) ja (3) ovat molemminpuolisia pienahitsejä. Hitsi (2) on tasaluja puoli V hitsi. Kaikki liitoslevyt ovat mitoitettu kiinnitysluokan-E mukaisesti liukumisen kestävinä. Tarkastelussa on liukumiskestävyys, palamurtuminen ja reunapuristuskestävyys. Liitoslevyt on tutkittu myös kokonaisuutena jännityksiä vastaan. Laskennan lähtötietoina ovat samat profiilit kuin leikkauspalaliitoksessa. Paarteiden kiinnikkeiden lähtötiedot on esitetty taulukossa 5.6 ja levyjen taulukossa 5.7. Yläpaarteen mitoituksen tulosten yhteenveto on esitetty taulukossa 5.8

**Taulukko 5.6** Universaaliitoksen paarteiden kiinnikkeet

Kiinnityskohta	koko	EN ISO	lujuus	d	d <sub>0</sub>
Yläpaarteen laipat	M30	4014	10,9	30	33
Yläpaarteen uuma	M24	4014	10,9	24	26
Diagonaali	M30	4014	10,9	30	33
Alapaarteen laipat	M30	4014	10,9	30	33
Alapaarteen uuma	M24	4014	10,9	24	26

**Taulukko 5.7** Universaaliliitoksen paarteiden levyt

Levy	tunnus	h	b	t	lkm	Teräs	fu	fy
Laippalevyt	PL1	1060	300	10	2	S355	510	355
Laippalevyt	PL2	1060	118	10	4	S355	510	355
Uumalevyt	PL3	530	206	10	2	S355	510	355
Sidelevy (puolikas)	PL4	420	160	15	2	S355	510	355
Sidelevyt	PL5	560	319	15	1	S355	510	355
Sidelevy (puolikas)	PL6	462	152	15	2	S355	510	355
Poskilevyt	PL7	464	140	10	4	S355	510	355
Poskilevyt	PL8	464	140	10	4	S355	510	355
Sidelevy	PL9	552	319	15	1	S355	510	355
Tulppalevyt	PL10	79	79	5	4	S355	510	355
Laippalevyt	PL11	1060	300	10	2	S355	510	355
Laippalevyt	PL12	1060	118	10	4	S355	510	355
Uumalevyt	PL13	530	206	10	2	S355	510	355

**Taulukko 5.8** Universaaliliitoksen yläpaarteen mitoituksen tulokset.

## YLÄPAARTEEN LASKENNAN TULOKSET

## YLÄPAARTEEN KESTÄVYYKSIEN YHTEENVETO

Mitoituskohta	Rasitus	Kestävyys	yksikkö	käyttöaste	
Levyjen normaalivoima	1800	2215	kN	0,81	OK
Leikkaus (uuman suunta)	150	422	kN	0,36	OK
Leikkaus (laippojen suunta)	125	857	kN	0,15	OK
Taivutus (y-suunta)	60	514	kNm	0,12	OK
Taivutus (z-suunta)	60	213	kNm	0,28	OK
Levyjen summajännitykset	262,7	355	N/mm <sup>2</sup>	0,74	OK
Hitsit (1+2+3) veto	1800	3328	kN	0,54	OK
Pulttien Veto/puristus	1800	5975,4	kN	0,30	OK
Levyjen veto/puristus	1800	10193,7	kN	0,18	OK
Profiilin veto/puristus	1800	4402,6	kN	0,41	OK
Laippalevyjen nurjahdus	364	794,2	kN	0,46	OK
Uumalevyjen nurjahdus	250	545,4	kN	0,46	OK
Suurin käyttöaste				0,81	

Liukumiskestävyys

Reunapuristus

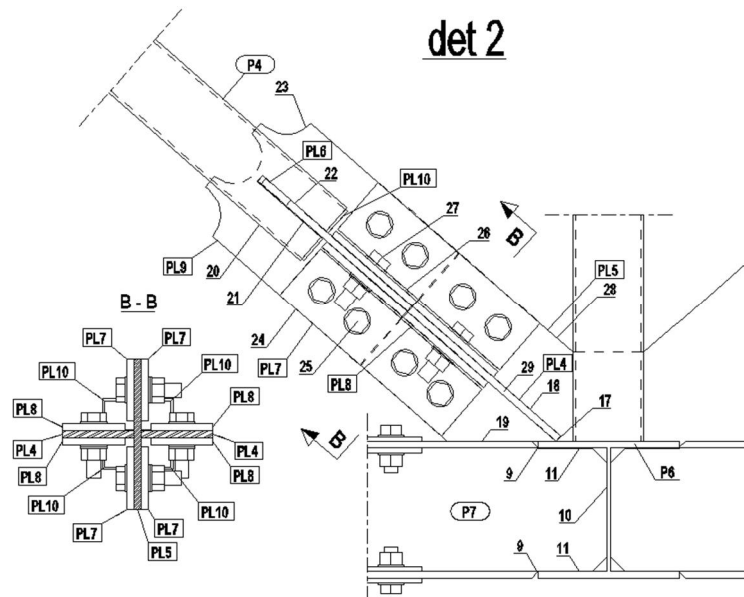
Palamurtuma

Pulttien välinen nurjahdus

Pulttien välinen nurjahdus

Kuvassa 5.9 on detalji ja leikkaus diagonaalin liitoksesta. Kuvassa on esitetty liitokseen kuuluvien profiilien ja levyjen tunnuksat ja tutkittavien kohtien numerointi. Kuvassa 5.10 on detalji alapaarteesta sekä sen leikkauksesta. Kuvassa on esitetty liitokseen kuuluvien

profiilien ja levyjen tunnukset, mitoitettavien osien numerot sekä osien mitoituksen tunnukset.



**Kuva 5.9** Liitoksen diagonaalin detalji ja sen leikkaus tunnuksineen.

Diagonaaliliitoksessa käytetyt levyt on esitetty taulukossa 5.9 ja diagonaalin mitoituksen tulosten yhteenveto on taulukossa 5.10.

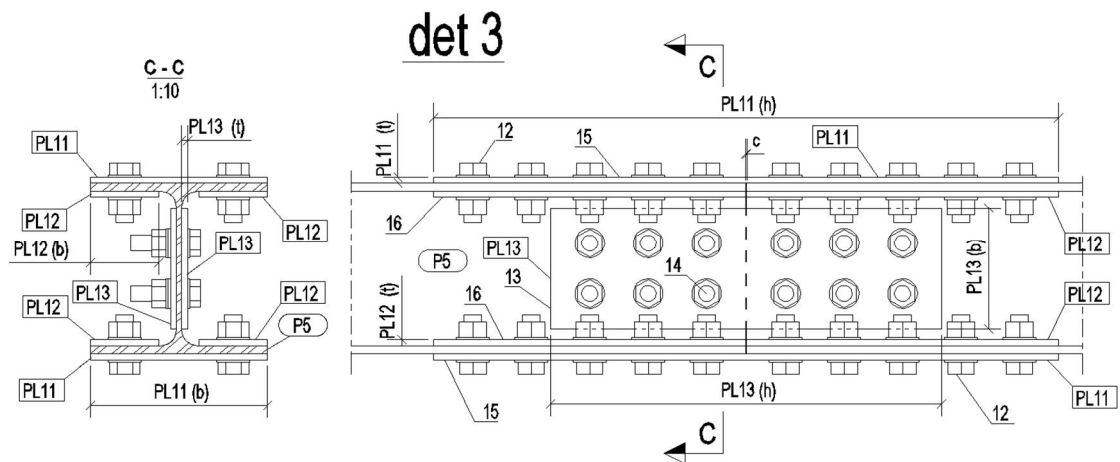
**Taulukko 5.9** Diagonaaliliitoksessa käytetyt levyt

LEVYT	h		b		t
PL4	420	x	160	x	15
PL5	560	x	319	x	15
PL6	462	x	152	x	15
PL7	464	x	140	x	10
PL8	464	x	140	x	10
PL9	552	x	319	x	15
PL10	79	x	79	x	5

**Taulukko 5.10** Diagonaaliliitoksen mitoituksen tulokset

DIAGONAALIN LASKENNAN TULOKSET					
DIAGONAALIN KESTÄVYYKSIEN YHTEENVETO					
Mitoituskohta	Rasitus	Kestävyys	yksikkö	käyttöaste	
PL4+PL5 Liukumiskestävyys	1500	1508	kN	0,99	OK
PL7+PL8 Liukumiskestävyys	1500	1508	kN	0,99	OK
PL6+PL9 Liukumiskestävyys	1500	1508	kN	0,99	OK
PL4+PL5 Reunapuristuskestävyys	1500	3060	kN	0,49	OK
PL7+PL8 Reunapuristuskestävyys	1500	3746	kN	0,40	OK
PL6+PL9 Reunapuristuskestävyys	1500	1522	kN	0,99	OK
PL4+PL5 Vetokestävyys	1500	2876	kN	0,52	OK
PL7+PL8 Vetokestävyys	1500	3039	kN	0,49	OK
PL6+PL9 Vetokestävyys	1500	2615	kN	0,57	OK
PL4+PL5 Palamurtuminen	1500	3022	kN	0,50	OK
PL7+PL8 Palamurtuminen	1500	1746	kN	0,86	OK
PL6+PL9 Palamurtuminen	1500	2226	kN	0,67	OK
PL4+PL5 Levyn nurjahdus	1500	3403	kN	0,44	OK
PL6+PL9 Hitsit 20 ja 21	1500	4570	kN	0,33	OK
PL4+PL5 Hitsit 19 ja 17	1500	4189	kN	0,36	OK
PL4 Hitsit 17 ja 18	375	3681	kN	0,10	OK
Suurin käyttöaste				0,99	

Kuvassa 5.10 on detalji ja leikkaus alapaarteen liitoksesta. Kuvassa näkyy profiili-, ja levytunnukset, tutkittavat kohdat numeroituna sekä osien mitoituksen tunnuksiset.

**Kuva 5.10** Liitoksen alapaarteen detalji ja sen B-B leikkaus tunnuksineen.

Alapaarteen lähtötiedot kiinnikkeistä, profiileista ja levyistä ovat tässä esimerkissä samat kuin yläpaarteella. Alapaarteen mitoituksen tulokset on esitetty taulukossa 5.11.

**Taulukko 5.11** Universaaliliitoksen alapaarteen mitoituksen tulokset

ALAPAARTEN LASKENNAN TULOKSET					
ALAPAARTEN KESTÄVYYKSIEN YHTENVETO					
Mitoituskohta	Rasitus	Kestävyys	yksikkö	käyttöaste	
Levyjen normaalivoima	1800	2215	kN	0,81	OK
Leikkaus (uuman suunta)	150	422	kN	0,36	OK
Leikkaus (laippojen suunta)	240	857	kN	0,28	OK
Taivutus (y-suunta)	60	514	kNm	0,12	OK
Taivutus (z-suunta)	60	213	kNm	0,28	OK
Levyjen summajännitykset	262,7	355	N/mm <sup>2</sup>	0,74	OK
Hitsit (1+2+3) veto	1800	3328	kN	0,54	OK
Pulttien Veto/puristus	1800	5975,4	kN	0,30	OK
Levyjen veto/puristus	1800	10871,6	kN	0,17	OK
Profiilin veto/puristus	1800	2556,7	kN	0,70	OK
Laippalevyjen nurjahdus	364	794,2	kN	0,46	OK
Uumalevyjen nurjahdus	250	545,4	kN	0,46	OK
Suurin käyttöaste				0,81	

Liukumiskestävyys

Reunapuristus

Palamurtuma

Pulttien välinen nurjahdus

Pulttien välinen nurjahdus

## 5.2.2 Universaaliliitoksen kustannuslaskenta

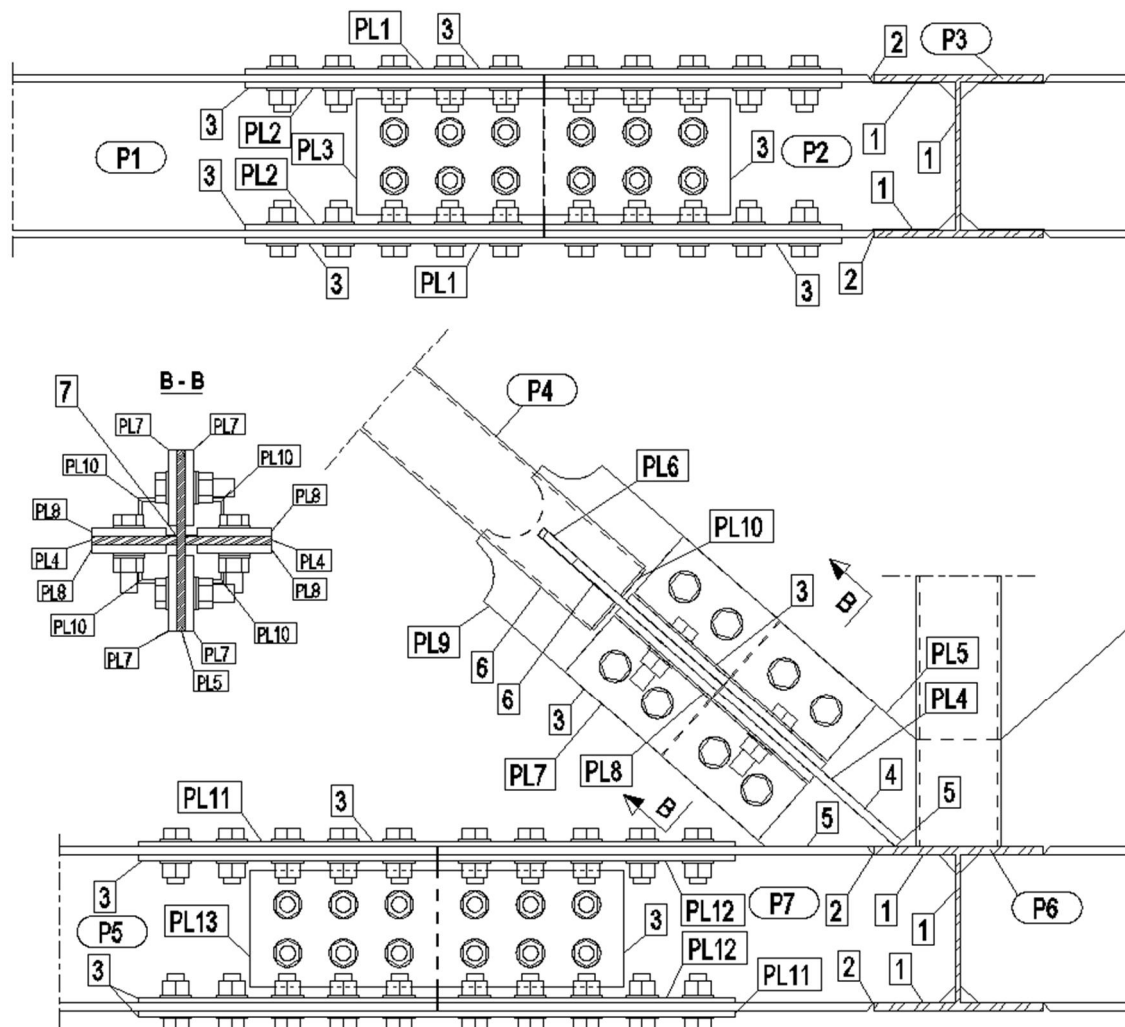
Tässä kappaleessa on esitetty universaaliliitoksen kustannukset lyhennetysti. Liitoksen kustannuslaskenta on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä D. Kustannukset koostuvat pääosin levyjen valmistuksesta (materiaali, puhdistus ja rei'itys) sekä työmaalla niiden kiinnittämisestä. Lähtötiedot osille ovat samat kuin niiden mitoituksellekin (vrt. kappale 5.2.1). Kustannusten yhteenveto on esitetty taulukossa 5.12.

**Taulukko 5.12** Universaaliliitoksen kustannusten yhteenveto

DET14: UNIVERSAALIILITOKSEN KUSTANNUSTEN YHTENVETO		
C <sub>SM</sub>	417,65 €	Levyn materiaalien kustannus
C <sub>B</sub>	2,32 €	Levyjen suihkupuhdistuksen kustannukset
C <sub>CU</sub>	76,85 €	Levyjen leikkauskustannukset
C <sub>D</sub>	318,23 €	Poraus (levyt)
C <sub>D</sub>	308,10 €	Poraus (profiilit)
C <sub>SM</sub>	82,20 €	Profiilin sahaus
C <sub>CO</sub>	16,25 €	Profiilin loveus (ei ole lovia)
C <sub>PA</sub>	174,32 €	Kokoonpano
C <sub>PT</sub>	65,70 €	Jälkikäsitteilyt ja tarkastukset
C <sub>P</sub>	36,66 €	Maalauslaskennat (vain levyjen maalaus)
C <sub>T</sub>	0,00 €	Kuljetuskustannukset (ei huomioida liitosvertailussa)
C <sub>E</sub>	1786,95 €	Asennuskustannukset (sis. Kiinnikkeiden hinnat)
C <sub>T</sub>	3285,21 €	Liitoksen kustannusvaikutukset

### 5.2.3 Universaaliliitoksen väsymiskestävyyden arviointi

Universaaliliitoksen väsymisluokkaa ja kestävyyttä ei todettu laskennallisesti tässä diplomityössä. Liitoksen väsymisrasitusten mahdollisuuksia, väsymiskestävyyden parantavia rakennerratkaisuja ja väsymisluokkaa on arvioitu teräsrakenteiden väsymiseen opastavan standardin EN 1993-1-9 esimerkkitaulukoiden sekä Henri Hautamäen diplomityön esittämän teräksen väsymisen yleisen teorian avulla [8, 17]. Kuvassa 5.11 on esitetty universaaliliitoksen väsymisen kannalta olennaisia tarkastelukohtia numeroituna.



**Kuva 5.11** Universaaliliitoksen väsymisarvioinnin tarkastelukohtat

Liitokseen on valittu korkean lujuuden ruuvit (10.9) murtorajassa liukumisen kestävässä C kiinnitysluokassa. Esijännitettyinä, ruuvit pienentävät tyypillisiä väsymismurtumia mutterin ja ensimmäisten kierteiden kohdalta [17, s. 12] ja samalla parantaen liitettävien perusmateriaalien väsymiskestävyyttä ruuviliitoksessa [17, s. 13]. Levyjen pienahitsauksille on edellytetty 0,5...1 mm railoitukset kuvan 2.12 mukaisesti. Railoitus poistavat hitsin ja perusmateriaalin rajapintaan tulevia alkusäröjä. Kantava rakenne on teräsrakenteiden osalta toteutusluokassa EXC3 [11 kappale 4.1.2]. Tämä asettaa hitsausluokaksi B [2



kappale 7.6]. Toteutusluokan EXC3 mukaiset vähimmäistarkastukset on esitetty taulukossa 2.17. Hitsien tarkastukset tulisi kohdentaa väsymisen ja kantavuuden kannalta kriittisiin saumoihin. Tämä liitosvaihtoehto ei sisällä merkittävästi hitsiliitoksia, jotka väsymisrasitettuna ovat vaurioherkkiä. Myöskään liitoksessa ei ole merkittävästi lamellirepeytymisen riskiä aiheuttavia rakenneratkaisuja. Diagonaaliliitoksessa siirtyminen puhtaasta putkiprofiilipoikkileikkauksesta hitsatuksi levyksi on tehty mahdollisimman sulavaksi. Asteittainen siirtyminen jäykempään rakenteeseen pienentää rajapinnan jännityspiikkiä ja siten vähentää putken ja sidelevyjen välisen pienahitsien väsymisrasitusta.

### **Liitoksen väsymisluokan arviointi.**

1. Väsymisluokka: 80

Profiili P2 on liitetty uumastaan profiiliin P2 molemminpuolisella pienahitsillä. Hitsien päät hiotaan huolellisesti reunahaavan poistamiseksi. Profiili P2 on uumaltaan viistetty kuvan 2.10 mukaisesti eikä profiilia P2 hitsata profiilin P3 pyöristykseen. Vastaava tilanne on alapaarteen profiilin P7 ja P6 liitoksessa. Väsymisluokan 80 rajoituksena profiilin uuman ja pienahitsien yhteisen z-mitan yhteismitan enimmäisarvo on 50 mm [8 taulukko 8.4 tapaus 7].

2. Väsymisluokka: 40 (valssatulla paarteella),

90 (hitsatuilla profiileilla jonka laipat muotoiltu)

Profiilin P2 laippa liittyy profiiliin P2 laippaan puoli V hitsauksella [8 taulukko 8.4 tapaus 5]. Väsymisluokkaa ei pysty parantamaan, mikäli yläpaarteen P2 on valssattu profiili. Mikäli profiili on tehty hitsatuista levyistä, sen laipat voidaan pyöristää haluamalla tavalla. Pyöristetty rajapinta mahdollistaa väsymisluokaksi 90 [8 taulukko 8.4 tapaus 4]. Tämän diplomityön laajuudessa tutkitaan vain valssattuja profiileita, mutta toteutuvassa kohteessa voidaan harkita hitsattujen profiilien käyttöä. Mikäli hitsattuja profiileita ei käytetä, kasvattamalla profiilin P2 laippojen poikkipinta-alaa, voidaan pienentää jännityksiä ja siten väsyttävää rasitusta. Tämä ei kuitenkaan paranna liitoksen väsymisluokkaa. Ylimoitettuna, se on pienemmän jännityksen alaisena, vähemmän altis väsymisvauriolle.

3. Väsymisluokka: 112

Kiinnityksissä käytetään osakierteisiä (ISO 4014), korkealujuuden (10.9), esijännitettyjä (kiinnitysluokka C) ruuveja. EN 1993-1-9 taulukossa 8.1 ilmoitetaan kaksileikkeiselle symmetriselle esijännitettyjen korkealujuusruuvien liitokselle väsymisluokaksi 112. Ruuvien reuna- ja keskiöetäisyyksille asetetaan tiukemmat rajat kuin EN 1993-1-8 taulukossa 3.3. Vaaditut minimietäisyydet on esitetty taulukossa 2.13. Tämä väsymisluokan määritelmä soveltuu tämän liitosvaihtoehdon paarteiden sekä diagonaalin ruuviliitoksille.

4. Väsymisluokka: 100



Liitos/jäykistelevy PL4 liittyy molemminpuolisella pienahitsauksella liitoslevyyn PL5. Hitsien päät hiotaan huolellisesti reunahaavan poistamiseksi. Oletetaan hitsauksen olevan käsivarainen, voidaan olettaa väsymisluokaksi 100 [8 taulukko 8.2 tapaus 7].

5. Väsymisluokka: 40

56 (PL5:sen huomattavalla uudelleen muotoilulla)

Liitoslevyt PL4 ja PL5 ovat molemminpuolisesti pienahitsattuja profiileihin P6 ja P7. Hitsien päät hiotaan huolellisesti reunahaavan poistamiseksi. Soveltaen EN 1993-1-9 taulukon 8.4 tapaus 1:stä ( $L > 100\text{mm}$ ) ja tapasta 6 ( $50 < l \leq 80\text{ mm}$ ) saadaan väsymisluokaksi arviolta 56. Liitoslevyn PL5:sen terävät liittymät Profiiliin P7 pahentaa tilannetta ja ilman tarkempia laskelmia väsymisluokka tulisi laskea yhdellä tasolla arvoon 40. Väsymisluokkaa voidaan parantaa uudelleen muotoilemalla levyä PL5 terävistä jännityskeskittymistä pyöreämmäksi.

6. Väsymisluokka: 71

Liitoslevyt PL6 ja PL9 kiinnitetään halkaistuun diagonaaliin P4 ympäri hitsatulla pienahitsillä. Hitsien päät hiotaan huolellisesti reunahaavan poistamiseksi. Väsymisluokan arvioinnissa sovelletaan EN 1993-1-9 taulukko 8.4 tapasta 2. Tästä saadaan väsymisluokaksi 71.

7. Väsymisluokka: 71

Liitoslevyt PL6 ja PL9 hitsataan pienahitsauksella toisiinsa. Hitsien päät hiotaan huolellisesti reunahaavan poistamiseksi. Väsymisluokan arvioinnissa sovelletaan EN 1993-1-9 taulukko 8.4 tapasta 2. Tästä saadaan väsymisluokaksi 71.

### **Universaaliliitoksen väsymisluokan arvioinnin tulokset.**

Liitoksen väsymisluokka: 40 (56 on mahdollinen muutoksilla)

Liitoksen arvioituksi väsymisluokaksi saadaan sen heikoimman arvon mukaan 40 käytettäessä valssattuja profiileita. Mikäli valssatut profiilit korvataan laipoiltaan pyöreästi liittyviksi hitsatuiksi ja diagonaalin liitoslevy PL5 muotoillaan poistaakseen sen teräviä kulmia, saadaan väsymisluokaksi 56. Stadionin pohjoisen ja etelä katoksen alustavan väsymistarkastelu dokumentin mukaan niskaristikkoon tehtävien liitosten tulisi olla vähintään väsymisluokkaa 40 [19 kappale 3.4]. Tämä liitostyyppi täyttää vaatimuksen alustavalla arvioinnilla, mutta laskennallinen tarkastelu on suositeltavaa.

## 6. TULOSTEN VERTAILU

### 6.1 Liitosten staattisen toiminnan arviointi

Tässä kappaleessa arvioidaan liitosvaihtoehtojen staattista jäykkyyttä (nivel, osittain jäykkä, jäykkä). Nämä ovat tämän työn omia arvioita eivätkä perustu varsinaisiin laskelmiin. Nämä pohdinnat ovat tarkoitettu rungon statiikan laskijan avuksi hänen arvioidessaan laskentamallinsa staattista oikeellisuutta.

Liitosvaihtoehto 1 on yläpaarteestaan pultattu niskaristikoon päätylevyjen välityksellä. Päätylevy on pultattu esijännitetyillä ruuveilla. Liitoksen jäykkyyteen vaikuttaa olennaisesti niskaristikon puoleisten päätylevyn jäykkyys. Korkealujuuksiset ja kooltaan massiiviset esijännitetyt ruuvit eivät jousta kohteen rasituksessa. Yläpaarteen liitos on oletettavasti lähellä jäykkää ja statiikaltaan sen voi yksinkertaistaa jäykäksi. Alapaarteen liitoksessa diagonaali on hitsattu täyteen seinämävahvuuteensa linjaristikon paarteeseen ja sen päätylevyyn. Päätylevy on tuettu työnaikaisesti leikkauspalalla, mutta liitoslevyt ovat kiinnitetty samoilla esijännitetyillä ruuveilla kuin yläpaarteessakin, mutta vähäisemmällä lukumäärällä. Liitoksen joustavin kohta on niskaristikon puoleinen liitoslevy.

Universaaliliitoksessa linjaristikon paarteiden kaksileikkeisen ja kiinnitysluokassa-C tehdyn jatkoksen oletetaan olevan jäykkä. Diagonaalin liitos on tehty kaksileikkeisenä, ristilevyllisenä ja murtorajassa liukumisen kestävässä kiinnitysluokassa. Teknisesti ottaen tämän voi olettaa jäykäksi, mutta ristikon diagonaalin liitoksen mallintaminen jäykäksi on harvinaista. Universaaliliitokset liittyvät niskaristikon uumaan ja laippoihin hitsattuun konsoliprofiiliin. Mikäli hitsaukset on tehty tasalujiksi, näitä voi olettaa osittain jäykäksi, mutta selkeästi vahvemmalle puolelle. Tämä riippuu pääasiassa liittyvän paarteen koosta.

### 6.2 Lujuudelliset eroavaisuudet

Kummatkin liitostyyppit ovat lähtöarvoisesti kestävämpiä kuin niihin liittyvät profiilit. Tämän työn liitoksen mitoituksen tarkkuus oli monessa paikassa vahvasti yksinkertaistettu ja varmalle puolelle. Liitosten todellisen mitoituksen optimointi vaatisi tarkempia laskelmia. Liitosten optimoinnilla on kuitenkin rajansa käytettävissä olevien levyvahvuuksien, tasalujien hitsien ja valittujen geometrioiden kautta. Liitosten heikoimmat kohdat saatiin kuitenkin esiin ja niitä muokkaamalla päästiin suunnilleen samoilta käyttöasteille. Yleisesti ottaen universaaliliitoksessa oli paremmat kapasiteetit käyttäen oletettuja levypaksuuksia.

### 6.3 Kustannukselliset eroavaisuudet

Puhtaasti kustannuksiltaan liitokset olivat hyvin eri luokkaa. Taulukossa 6.1 on esitetty liitosten kustannukset vierekkäin.

**Taulukko 6.1** Kustannusten vertailu

	Det14	Det4	
$C_{SM}$	417,65	387,56 €	Levyn materiaalien kustannus
$C_B$	2,32	0,42 €	Levyjen suihkupuhdistuksen kustannukset
$C_{cu}$	76,85	39,67 €	Levyjen leikkauskustannukset
$C_D$	318,23	49,71 €	Poraus (levyt)
$C_D$	308,10	0,00 €	Poraus (profiilit)
$C_{SM}$	82,20	47,78 €	Profiilin sahaus
$C_{co}$	16,25	0,00 €	Profiilin loveus
$C_{PA}$	174,32	154,59 €	Kokoonpano
$C_{PT}$	65,70	44,18 €	Jälkikäsitteilyt ja tarkastukset
$C_P$	36,66	17,13 €	Maalaus-kustannukset (vain levyjen maalaus)
$C_T$	0,00	0,00 €	Kuljetuskustannukset (ei huomioida liitosvertailussa)
$C_E$	1786,95	398,48 €	Asennuskustannukset (sis. Kiinnikkeiden hinnat)
$C_T$	3285,21	1139,52 €	Liitoksen kustannus

Liitosten olennaisin ero tulee kiinnikkeissä. Vaikka käytettäisiin normaaleita 8.8 lujuusluokan pultteja leikkauksessa, kustannusero säilyy lähes samana. Leikkauspalaliitos (det 4) on merkittävästi halvempi.

### 6.4 Väsymisluokkien eroavaisuudet

Tutkittujen liitosten väsymisluokka arvioitiin molemmille liitoksille samaksi. Väsymisluokan määrittämisessä oli tutkia koko liitos ja etsiä sieltä heikoin väsymisluokka joka määritteli koko liitoksen. Samasta väsymisluokastaan huolimatta, liitokset eivät ole mielestäni samanarvoiset väsymisen kannalta. Leikkauspalaliitoksessa on useampi selkeästi heikko kohta väsymiselle ja kyseiset heikkoudet sijaitsevat rakenteen kantavuuden kannalta erittäin kriittisissä kohdissa. Leikkauspalaliitosta ei myöskään pysty muuttamaan rakenteellisesti parempaan väsymisluokkaan ilman, ettei koko liitostyyppi vaihdu. Ongelma on isojen päätylevyjen kiinnittyessä niskaristikon paarteeseen. Niskaristikon aksiaalinen kuormitus yhdistettynä massiiviseen rajapintaan liitoslevyn kohdalla tekee väsymisluokan muutoksesta mahdotonta. Universaaliliitos on erittäin vahva pulttiliitoksiensa ansiosta. Tässä liitoksessa on myös sama heikkous kuin leikkauspalaliitoksessa. Linjaristikon paarteen laipan kiinnittyessä niskaristikon paarteen laippaan aiheuttaa lähes saman tilanteen kuin leikkauspalaliitoksessa. Toisinkuin leikkauspalaliitoksessa, tämä liitostyyppi on muokattavissa parempaan väsymisluokkaan. Linjaristikon paarteet tulisi vaihtaa hitsatuiksi profiileiksi joiden laipat ovat muotoiltu kaarevaksi liitokseksi. Tämä ei ole mahdollista tämän diplomityön olettamilla valssatuilla profiileilla. Tämä muutos ei kuitenkaan kasvata väsymisluokkaa merkittävästi.

## 7. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

### 7.1 Yhteenveto

Tässä diplomityössä tutustuttiin teräsrakenteisten liitosten rakenteelliseen mitoittamiseen eurokoodilla ja liitosten kustannusvaikutuksiin. Aihepiirit esiteltiin aluksi yleisen teorian kautta ja niitä sovellettiin esimerkkikohteeseen. Tutkittavana oli Helsingin Olympia stadionin peruskorjauksen yhteydessä tehtävän katsomokatoksen teräsliitoksia. Tutkittavan liitoksen suuri toistuvuus kasvattaa kustannuserojen merkitystä. Jotta liitosvaihtoehdot olisivat kustannuksiltaan vertailukelpoisia, liitosten mitoituksella pyritään suunnilleen samaan käyttöasteeseen. Kohteen lentokoneen siiven muotoa muistuttava katos on luokiteltu väsyttävän kuorman rasittamaksi. Väsyminen täytyi ottaa huomioon liitosten rakenteellisessa suunnittelussa. Työn tuloksena oli tarkoitus tehdä käyttäjäystävällinen taulukkolaskentapohja kohdennettujen liitostyyppien mitoittamiseen sekä niiden kustannusten arviointiin. Sen avulla arvioitiin liitosvaihtoehtojen kustannusvaikutuksia.

### 7.2 Johtopäätökset

Liitosvaihtoehdot olivat rakenteellisesti hyvin erilaisia. Tämä teki yhtenevän käyttöasteen löytämisestä haasteellista. Mitoitus oli yksinkertaistettu ja liitokset eivät ole aivan samassa käyttöasteessa samoilla kuormilla. Tämä aiheuttaa toleranssia kustannuslaskennan tuloksiin. Käyttäen oletettuja levypaksuuksia ja järkeviä hitsien kokoja, universaaliliitos antaa parempia kapasiteetteja. Kustannuslaskennan erot liitosvaihtoehdoille oli kuitenkin niin suuret, ettei halvemmasta vaihtoehdosta ollut epävarmuutta. Leikkauspalaliitos oli selkeästi halvempi. Kustannusero näkyi selvimmin kiinnikkeiden kustannusvaikutuksissa. Liitteissä on esitetty liitosten rakenteellinen mitoitus ja kustannuslaskenta. Oli erittäin opettavaista huomata liitosvaihtoehtojen kustannusten eron suuruus. Jokaisen teräsrakennesuunnittelijan tulisi osata edes kustannuslaskennan perusteet. Tällä osaamisella olisi varmasti vaikutusta suunnittelijoiden rakenneratkaisuihin.

Tutkitut liitokset arvioitiin väsymisluokkaan 40, joka on alin hyväksyttävä taso tässä kohteessa tehdyn alustavan väsymismitoituksen mukaan [19 kappale 3.4]. Väsymisluokan arviointi tehtiin vähäisellä kokemuksella ja soveltamalla standardissa annettujen vastaavien liitosten taulukkoarvoja. Näitä on verrattu alustavien laskelmien raja-arvoihin. Tässä työssä saatujen väsymisluokkien soveltuvuutta vaativassa kohteessa tulisi arvioida kriittisesti ja verrata niitä myöhemmin projektissa tarkentuviin raja-arvoihin.

*Mikäli myöhemmin tarkentuvat väsymistarkastelut eivät vaadi liitokselta korkeampaa väsymisluokkaa, suosittelen käyttämään leikkauspalaliitosta kyseisessä kohteessa.*

### 7.3 Jatkotutkimusehdotukset

Tässä työssä esitetyillä rakenteellisen mitoituksen ja kustannusteorian avulla olisi mahdollista laajentaa taulukkolaskentapohjaa kattamaan muitakin liitosvaihtoehtoja. Tällä hetkellä laskentapohja olettaa esijännitetyt kiinnikkeet. Kohtuullisella vaivalla laskennan saisi laajennettua kattamaan myös muutkin kiinnitysluokat. Mitoitustyökalun tavoitteena oli automatisoida liitoslevyjen sekä pulttien reunaetäisyyksiä käyttäjän valitsemien profiilien perusteella. Tämä nopeuttaa merkittävästi liitoksen suunnittelijan työtä. Profiili-geometria saatiin valmiiden profiilien kirjastosta. Geometrisen automatisoinnin kasvassa, käyttäjän vaikutusmahdollisuudet liitoksen geometriaan usein rajoittuvat. Käytännöllisen tasapainon löytäminen näiden väliltä on yksi laskentapohjan kehityssuunnista. Kohteessa käytetään paljon hitsattuja profiileita ja laskentapohjasta puuttuu automatisoitu hitsattujen profiilien laskenta. Laskentapohjan laajennus hitsattuihin profiileihin parantaisi laskentapohjan käytettävyyttä merkittävästi. Kustannuslaskennan osuus on erittäin keskittynyttä kyseisiin esimerkkitapauksiin. Laskentapohja ei laske rajallisen automatiikkansa vuoksi moninaisia variaatioita ehdotetuista liitostyypeistä ilman manuaalista parametrien asettamista. Kustannuslaskennan automatisoinnin lisääminen on käyttäjäystävällisyyden kannalta olennaista.

Runkoa tutkittaessa ideaalisilla momenttivapailla nivelliitoksilla tai vastaavasti momenttijäykillä liitoksilla, usein jää toteutuvien liitosten jäykkyyden vaikutus huomioimatta. Ellei erityistä huomiota aseteta suunnitteluun, liitokset ovat yleensä jotain nivelellisen ja jäykän liitoksen väliltä. Erityisesti kehärakenteilla voidaan päästä kokonaisuutena halvempaan ratkaisuun kun liitos on jäykkyydeltään osittain jäykkä.

## LÄHTEET

### NORMISTOA/LÄHTEITÄ

- [ 1 ] EN 1993-1-8, Teräsrakenteiden suunnittelu, osa 1-8: Liitosten mitoitus, Helsinki 2005 Suomen standardisoimisliitto. 151 s.
- [ 2 ] EN 1090-2, Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus. Osa 2: Teräsrakenteita koskevat tekniset vaatimukset. Helsinki 2012, Suomen standardisoimisliitto. 198 s.
- [ 3 ] Rautaruukki, Rakenneputket EN 1993 –käsikirja. Keuruu 2012, Rautaruukki. 688 s.
- [ 4 ] Haapio Jaakko. Feature-Based Costing Method for Skeletal Steel Structures based on the Process Approach. Tampere 2012, Tampere University of Technology. 99 s.
- [ 5 ] EN 10025-2, Kuumavalssatut rakenneteräkset. Osa 2: Seostamattomat rakenneteräkset. Tekniset toimitusehdot. Helsinki 2004, Suomen standardisoimisliitto. 67 s.
- [ 6 ] EN 1993-1-5, Teräsrakenteiden suunnittelu, osa 1-5: Tasomaiset levyrakenteet, Helsinki 2006 Suomen standardisoimisliitto. 59 s.
- [ 7 ] EN 1993-1-1, Teräsrakenteiden suunnittelu, osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki 2005, Suomen standardisoimisliitto. 101 s.
- [ 8 ] EN 1993-1-9, Teräsrakenteiden suunnittelu, osa 1-9: Väsyminen. Helsinki 2005, Suomen standardisoimisliitto. XXX s.
- [ 9 ] Niemi, E., Kemppi, J. Hitsatun rakenteen suunnittelu perusteet. Helsinki 1993, Opetushallitus. 337 s.
- [ 10 ] Esimerkkikohteen dokumentti: [ei julkinen] Stadionin dokumentti R\_SXXXX Katoksen tuulikuormien määrittämisen yhteenveto. Tampere 2015, Sweco, Kukkonen J. 17 s.
- [ 11 ] Esimerkkikohteen dokumentti: [ei julkinen] Stadionin dokumentti R\_S0201 Etelä- ja pohjoiskaarten uusien teräskatosten toteutuseritelmä. Tampere 2015, Sweco, Kukkonen J. 41 s.

- [ 12 ] Esimerkkikohteen dokumentti: [ei julkinen] Stadionin dokumentti R\_SXXXX Teräskatosten liitosten suunnittelun periaatteet. Tampere 2015, Sweco, Kukkonen J. 9 s.
- [ 13 ] Esimerkkikohteen dokumentti: [ei julkinen] Stadionin dokumentti R\_D8400 Liitosten periaatedetaljit, katsomokatos, periaatedetaljit. Tampere 2015, Sweco, Kukkonen J. 15 s.
- [ 14 ] Rautaruukki, Hitsatut profiilit EN 1993 –käsikirja. 3. painos. Keuruu 2012, Rautaruukki. 608 s.
- [ 15 ] SFS EN ISO 8501, Teräspintojen esikäsittely ennen pinnoitusta maalilla tai vastaavilla tuotteilla. Pinnan puhtauden arviointi silmämääräisesti. Osa1: Teräspintojen ruostumisasteet ja esikäsittelyasteet. Helsinki 2007, Suomen standardisoimisliitto. 25 s.
- [ 16 ] SFS-EN ISO 4014, Hexagon head bolts. Product grades A and B. Helsinki 2011, Suomen standardisoimisliitto. 26 s.
- [ 17 ] Hautamäki, H. 2015. Teräsrakenteiden väsymismitoitus. Diplomityö. Tampere, Teknillinen yliopisto. Konetekniikan osasto. 90s.
- [ 18 ] Esimerkkikohteen dokumentti: [ei julkinen] Stadionin dokumentti R\_BS0203 Teräskatoksen rakennelaskelmat, eteläkaarre. Tampere 2015, Sweco, Kukkonen J. 290 s.
- [ 19 ] Esimerkkikohteen dokumentti: [ei julkinen] Stadionin dokumentti R\_SXXXX Alustava väsymistarkastus. Tampere 2015, Sweco, Kukkonen J. 27 s.

# LIITE A: LIITOSVAIHTOEHTO 1 LUJUUSLASKELMAT

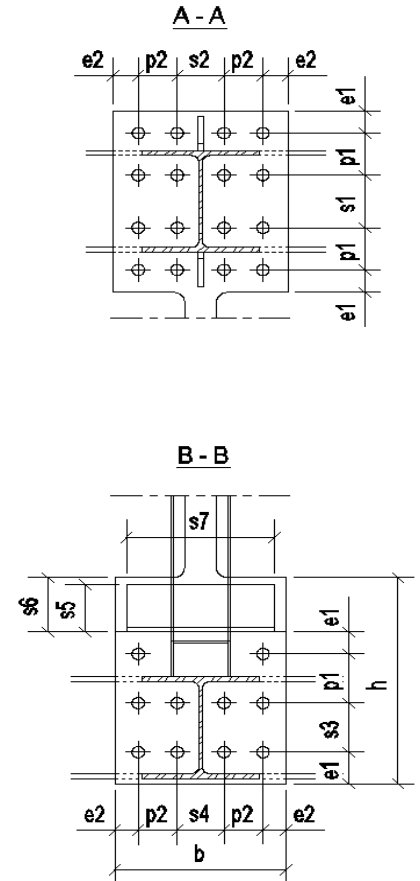
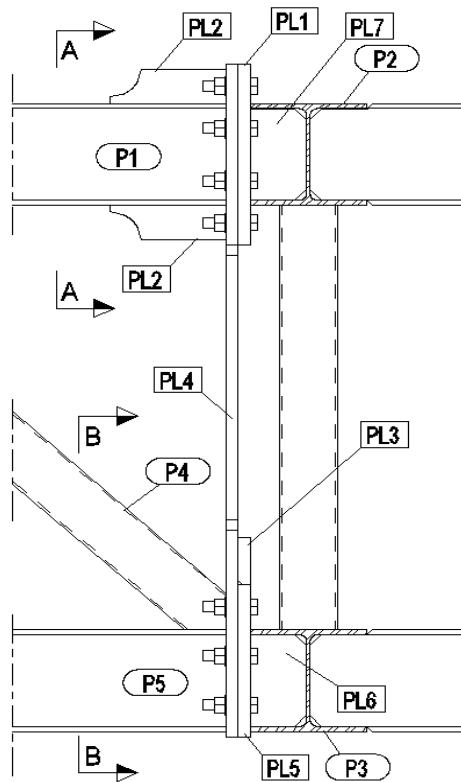
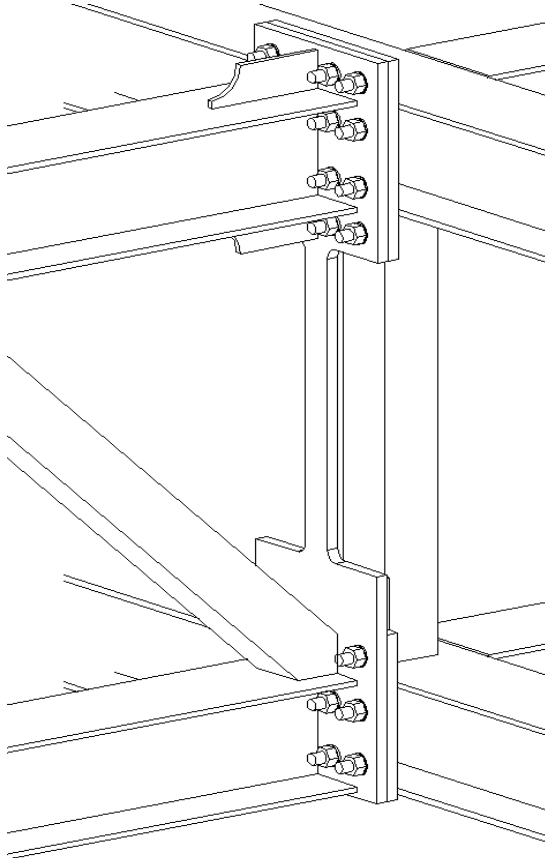
## LIITOSLASKENTA [ Liitosvaihtoehto 1: Leikkauspalaliitos ]

### LIITOSTEN OSAVARMUUSLUVUT

[EN 1993-1-8, taulukko 2.1]

Rakenneosien ja poikkileikkauksien kestävyys ( ks. EN 1993-1-1)	$\gamma_{M0}$	1,0
	$\gamma_{M1}$	1,0
	$\gamma_{M2}$	1,25
Ruuvien kestävyys	$\gamma_{M2}$	1,25
Niittien kestävyys		
Niveltappien kestävyys		
Hitsien kestävyys		
Reunapuristuskestävyys		
Liukumiskestävyys	$\gamma_{M3}$	1,25
- Murtorajatilassa (kiinnitysluokka C)		
- Käyttöraajatilassa (kiinnitysluokka B)	$\gamma_{M3,ser}$	1,1
Injektioruuvien reunapuristuskestävyys	$\gamma_{M4}$	1,0
Rakenneputkien liitosten kestävyys ristikoissa	$\gamma_{M5}$	1,0
Niveltappien kestävyys käyttöraajatilassa	$\gamma_{M6,ser}$	1,0
Ruuvien esijännitys	$\gamma_{M7}$	1,1
Betonin kestävyys ( ks. EN 1992)	$\gamma_c$	-

### LIITOKSEN KOKONAISKUVA JA OSIEN TUNNUKSET





# LIITE A: LIITOSVAIHTOEHTO 1 LUJUUSLASKELMAT

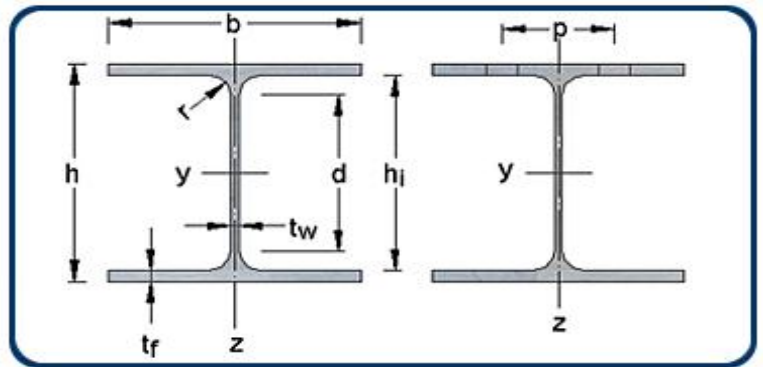
## PROFIILIT

Tunnus	Profiili	h	b	t <sub>w</sub>	t <sub>f</sub>	r	A	h <sub>i</sub>	d
-	-	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm <sup>2</sup> ]	[ mm ]	[ mm ]
P1	HEA300	290	300	8,5	14	27	11250	262	208
P2	HEA300	290	300	8,5	14	27	11250	262	208
P3	HEA300	290	300	8,5	14	27	11250	262	208
P4	CFRHS 180x180x6	180	180	12,5	12,5	37,5	7704	155	105
P5	HEA300	290	300	8,5	14	27	11250	262	208

## MATERIAALIT

(SFS-EN10025-2)

tunnus	osa	teräslaji
P1	YLÄPAARRE	S355
P2	NISKARISTIKKO-YP	S355
P3	NISKARISTIKKO-AP	S355
P4	DIAGONAALI	S355
P5	ALAPAARRE	S355
PL	LEVYT	S355

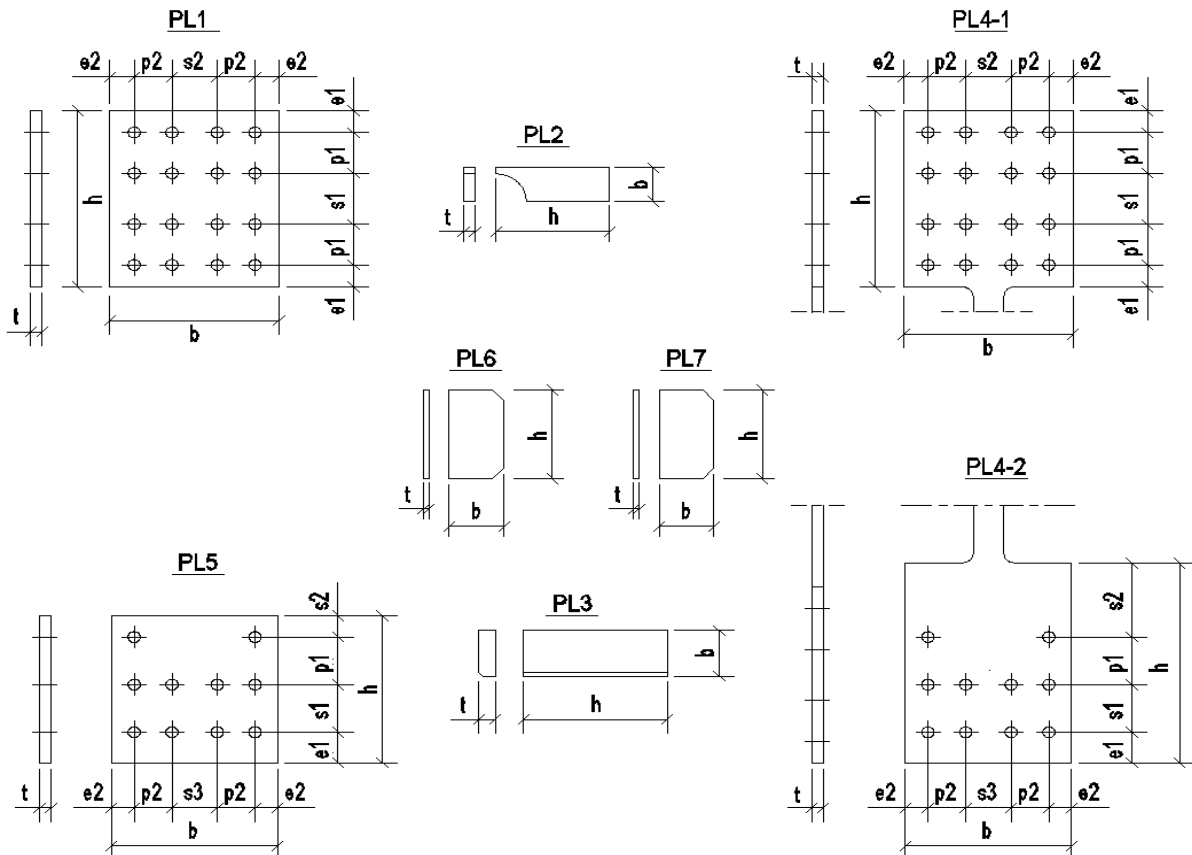


Profiilin mittojen selitykset.

## KIINNIKKEET

Kiinnityskohta	koko	EN ISO	lujuus	d	d <sub>0</sub>
YLÄPAARRE	M30	4014	10,9	30	33
ALAPAARRE	M24	4014	10,9	24	26

## LIITOSLEVYT



# LIITE A: LIITOSVAIHTOEHTO 1 LUJUUSLASKELMAT

## LIITOSLEVYT

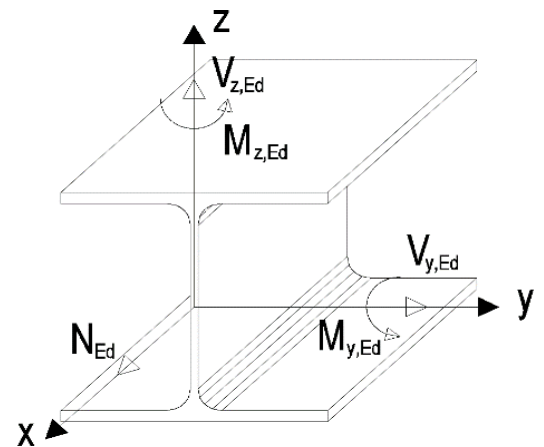
[mm]	PL1	PL2	PL3	PL4-1	PL4-2	PL5	PL6	PL7
e1	64	0	0	64	90	90	0	0
p1	120	0	0	120	140	140	0	0
e2	64	0	0	64	60	60	0	0
p2	100	0	0	100	100	100	0	0
s1	150	0	0	150	140	140	0	0
s2	120	0	0	120	218	63	0	0
s3	0	0	0	0	120	120	0	0
b	448	300	135	448	440	440	145	145
h	518	100	380	518	588	433	260	260
t	20	15	30	20	30	20	10	10

## PROFIILIN P1 POIKKILEIKKAUSARVOJA

$\Sigma A$	11250 mm <sup>2</sup>	Yläpaarteen poikkileikkauspinta-ala
$\Sigma A_{Vz}$	2227 mm <sup>2</sup>	
$\Sigma A_{Vy}$	8400 mm <sup>2</sup>	
$W_y$	1260 cm <sup>3</sup>	
$W_z$	420,6 cm <sup>3</sup>	

## KUORMITUS: [ YLÄPAARRE ]

$N_{Ed}$	1800	kN	Normaalivoima (+ = puristus)
$V_{z,Ed}$	150	kN	Leikkausvoima uuman suuntaan
$V_{y,Ed}$	125	kN	Leikkausvoima laipan suuntaan
$M_{y,Ed}$	60	kNm	Momentti vahvaan suuntaan
$M_{z,Ed}$	60	kNm	Momentti heikkoon suuntaan



## YLÄPAARTEEN HITSIT

Kohta	Hitsi tyyppi	a-mitta	Tarkennus
1	Piena mp	5	molemmin puolin, railoitettuna 0,5 ... 1 mm
2	Piena mp	5	molemmin puolin, railoitettuna 0,5 ... 1 mm
3	Piena mp	5	molemmin puolin, railoitettuna 0,5 ... 1 mm
4	Puoli V tasalle	14	Tasaluja hitsi on hiottu tasalle

## YLÄPAARTEEN TASALUIJEN HITSIEN JÄNNITYKSET (= profiilin jännitykset)

Normaalivoima

[kaikki pisteet]

$N_{Ed}$	$\Sigma A$	$\sigma_N$
kN	mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1800	11250	160,0

$$\sigma_N = \frac{N_{Ed}}{A}$$

Leikkausvoima (z)

[piste 4]

$V_{z,Ed}$	$\Sigma A_{Vz}$	$\sigma_{Vz}$
kN	mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
150	2227	116,7

$$\sigma_{Vz} = \frac{V_{z,max}}{A_{Vz}} = \frac{\sqrt{3} * V_{z,Ed}}{2 * b_{PL3} * t_{PL3}}$$

Leikkausvoima (y)

[pisteet 2, 6]

$V_{y,Ed}$	$\Sigma A_{Vy}$	$\sigma_{Vy}$
kN	mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
125	8400	14,9

$$\sigma_{Vy} = \frac{V_{y,max}}{A_{Vy}} = \frac{\sqrt{3} * V_{y,Ed}}{2 * b_{PL1} * t_{PL1}}$$

Momentti (y)

(+) [pisteet 5,6,7]

(-) [pisteet 1,2,3]

$M_{y,Ed}$	$W_y$	$+\sigma_{My}$	$-\sigma_{My}$
kNm	cm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
60	1260	47,6	-47,6

$$\sigma_{My} = \frac{M_{y,Ed}}{W_y}$$

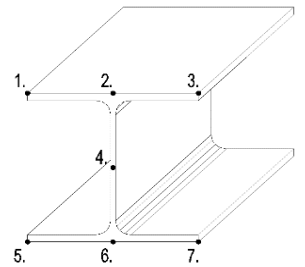
Momentti (z)

(+) [pisteet 3,7]

(-) [pisteet 1,5]

$M_{z,Ed}$	$W_z$	$+\sigma_{Mz}$	$-\sigma_{Mz}$
kNm	cm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
60	421	142,7	-142,7

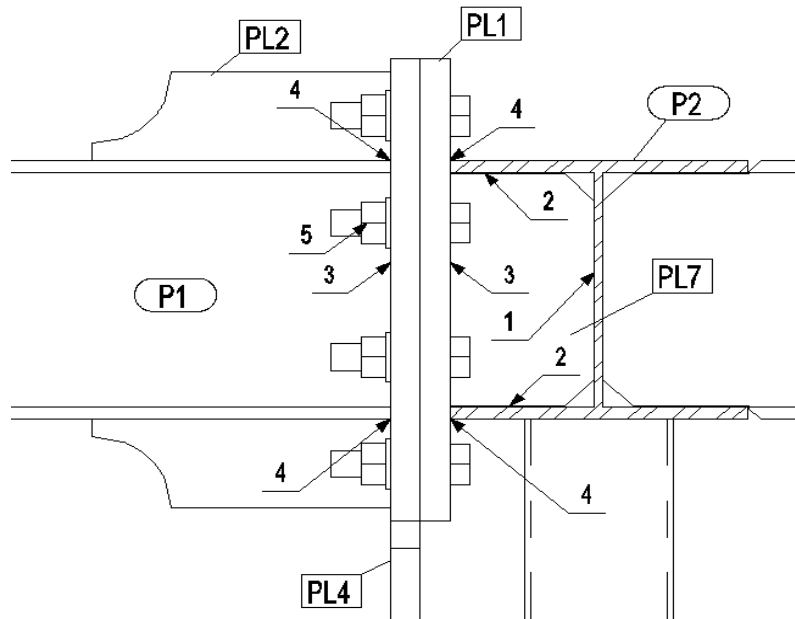
$$\sigma_{Mz} = \frac{M_{z,Ed}}{W_z}$$



status	Tarkastelupiste	$\sigma_N$	$\sigma_{Vz}$	$\sigma_{Vy}$	$\sigma_{My}$	$\sigma_{Mz}$	$\Sigma \sigma$	$\pm \sigma_{vertailu}$	käyttöaste
		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
OK	1	160,0	0	0	-47,6	-142,7	-30,3	355	0,09
OK	2	160,0	0	14,9	-47,6	0	127,3	355	0,36
OK	3	160,0	0	0	-47,6	142,7	255,0	355	0,72
OK	4	160,0	116,7	0	0	0	276,7	355	0,78
OK	5	160,0	0	0	47,6	-142,7	65,0	355	0,18
OK	6	160,0	0	14,9	47,6	0	222,5	355	0,63
OK	7	160,0	0	0	47,6	142,7	350,3	355	0,99

Suurin käyttöaste 0,99

## YLÄPAARTEEN OSIEN MITOITUS



## MITOITETTAVAT ASIAT

- 1) Jäykistelevyn hitsin kestävyys
- 2) Jäykistelevyn hitsin kestävyys
- 3) Jäykistelevyn hitsin kestävyys
- 4) Profiilien laippahitsien kestävyys
- 5.1) Liukumiskestävyys
- 5.2) Pulttien vetokapasiteetti
- 5.3) Ruuvien ja mutterien lävistäminen (PL1)
- 5.4) Ruuvien ja mutterien lävistäminen (PL4)
- 5.5) Pulttien leikkauskestävyys
- 5.6) Pulttien yhteisvaikutus leikkaukselle ja vedolle
- 5.7) Pulttien vetokestävyys (redusoitu)
- 5.8) Levyn (PL1) reunapuristuskestävyys
- 5.9) Levyn (PL4) reunapuristuskestävyys
- 5.10) Levyn taivutus (PL1)

## (1) Hitsien kestävyys

$L_w$	396 mm
$a$	5 mm
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>
$\beta_w$	0,9 -
$\gamma_{M2}$	1,25 -

Hitsin pituus ( $L_w = (d_{p2} - 10\text{mm}) \cdot 2$ )

Pienahitsi molemmin puolin ( $a = t_{w,PL7}/2$ , pyör. ylös)

Heikoimman osan vetomurtolujuus

EN 1993-1-1, taulukko 3.1

Korrelaatiokerroin

EN 1993-1-8, taulukko 4.1

Hitsien osavarmuus

EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$$F_{w,Rd} = \frac{L_w \cdot a \cdot f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot \sqrt{3}}$$

EN 1993-1-8, kaavat 4.3 ja 4.4

 $F_{w,Rd}$  518,2 kN

## (2) Hitsien kestävyys

$L_w$	467 mm
$a$	5 mm
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>
$\beta_w$	0,9 -
$\gamma_{M2}$	1,25 -

Hitsin pituus (kaksi laippa, molemmin puolin) ( $L_w = 2 \cdot 2 \cdot (b_{p2}/2 - t_{w,p2}/2 - r - 2)$ )

Pienahitsi molemmin puolin ( $a = t_{w,PL7}/2$ , pyör. ylös)

Heikoimman osan vetomurtolujuus

EN 1993-1-1, taulukko 3.1

Korrelaatiokerroin

EN 1993-1-8, taulukko 4.1

Hitsien osavarmuus

EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$$F_{w,Rd} = \frac{L_w \cdot a \cdot f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot \sqrt{3}}$$

EN 1993-1-8, kaavat 4.3 ja 4.4

 $F_{w,Rd}$  611,1 kN

## (3) Hitsien kestävyys

$L_w$	524 mm
$a$	5 mm
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>
$\beta_w$	0,9 -
$\gamma_{M2}$	1,25 -

Hitsin pituus ( $L_w = h_{ip2} \cdot 2$ )

Pienahitsi molemmin puolin ( $a = t_{PL7}/2$ , pyör. ylös)

Heikoimman osan vetomurtolujuus

EN 1993-1-1, taulukko 3.1

Korrelaatiokerroin

EN 1993-1-8, taulukko 4.1

Hitsien osavarmuus

EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$$F_{w,Rd} = \frac{L_w \cdot a \cdot f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot \sqrt{3}}$$

EN 1993-1-8, kaavat 4.3 ja 4.4

 $F_{w,Rd}$  685,7 kN

# LIITE A: LIITOSVAIHTOEHTO 1 LUJUUSLASKELMAT

## (4) Hitsien kestävyys

$L_w$	896 mm	Hitsin pituus ( $L_w = 2 * b_{PL1}$ )	
$a$	14 mm	Tasaluja puoli V hitsi hiottu tasalle. ( $a = t_{r,P2}$ )	
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Heikoimman osan vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$\beta_w$	0,9 -	Korrelaatiokerroin	EN 1993-1-8, taulukko 4.1
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Hitsien osavarmuus	EN 1993-1-8, taulukko 2.1
$F_{w,Rd}$	3283,2 kN	$F_{w,Rd} = \frac{L_w * a * f_u}{\beta_w * \gamma_{M2} * \sqrt{3}}$	EN 1993-1-8, kaavat 4.3 ja 4.4

## (5.1) Liukumiskestävyys

$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$d$	30 mm	Pultin halkaisija	
$A_s$	561 mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$F_{p,C}$	393 kN	Esijännitysvoima	EN 1993-1-8, kaavat 3.7
		$F_{p,C} = 0,7 * f_{ub} * A_s$	
$k_s$	1 -	Normaalit pyöreät reiät	EN 1993-1-8, Taulukko 3.6
$n$	1 -	Kitkapintojen lukumäärä	
$\mu$	0,4 -	Kitkakerroin (luokka B)	EN 1993-1-8, Taulukko 3.7
$l_{km}$	10 kpl	Pulttien lukumäärä	
$\gamma_{M3}$	1,25 -	Liukumiskestävyys (luokka C)	EN 1993-1-8, taulukko 2.1
$F_{s,Rd}$	1256,6 kN	$F_{s,Rd} = \frac{k_s * n * \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C}$	EN 1993-1-8, kaavat 3.6

## (5.2) Pulttien vetokestävyys

$k_2$	0,9 -	Kerroin	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$d_0$	33 mm	Pultin reiän halkaisija	
$A_{s,i}$	561 mm <sup>2</sup>	Yhden pultin poikkipinta-ala	
$n_b$	10 kpl	Pulttien lukumäärä	
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Pulttien osavarmuusluku	EN 1993-1-8, taulukko 2.1
$F_{t,Rd}$	4039,2 kN		

## (5.3) Pulttien ja mutterin lävistyminen (PL1)

$d_m$	33 mm	Pultin reiän halkaisija	
$t_p$	20 mm <sup>2</sup>	Levyn paksuus	
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	
$n_b$	10 kpl	Pulttien lukumäärä	
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Pulttien osavarmuusluku	EN 1993-1-8, taulukko 2.1
$B_{p,Rd}$	5075,8 kN	(Kaikkien pultit yhteensä)	

(5.4) Pulttien ja mutterin lävistyminen (PL4)

$d_m$	26 mm	Pultin reiän halkaisija	
$t_p$	20 mm <sup>2</sup>	Levyn paksuus	
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	
$n_b$	10 kpl	Pulttien lukumäärä	
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Pulttien osavarmuusluku	EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$$B_{p,Rd} = 3999,1 \text{ kN}$$

(5.5) Pulttien leikkauskestävyys

$\alpha$	0,5 mm	Kerroin	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$d$	30 mm	Pultin halkaisija	
$A_s$	561 mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$n_b$	10 kpl	Pulttien lukumäärä	
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Pulttien osavarmuusluku	EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$$F_{V,Rd} = 2244,0 \text{ kN}$$

(5.6) Yhdistetty leikkaus- ja vetovoima

$F_{vz,Ed}$	125 kN	Leikkausvoima (uuman suuntaan)	
$F_{vy,Ed}$	150 kN	Leikkausvoima (laippojen suuntaan)	
$F_{v,Ed}$	195 kN	Kahden akselin leikkausvoiman resultantti $F_{v,Ed} = (F_{vy,Ed}^2 + F_{vz,Ed}^2)^{0,5}$	
$F_{t,Ed}$	1800 kN	Vetovoima	
$F_{t,Rd}$	4039 kN	Pulttien vetokestävyys	
$F_{V,Rd}$	2244 kN	Pulttien leikkauskestävyys	

$$YVE = 0,41 - \quad F_{v,Ed} / F_{V,Rd} + F_{t,Ed} / 1,4 * F_{t,Rd} \leq 1,0 \quad \text{EN 1993-1-8, taulukko 2.1}$$

(5.7) Pulttien vetokestävyys (reduoitu)

$F_{t,Rd}$	4039 kN	Pulttien vetokestävyys	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$F_{v,Ed}$	195 kN	Kahden akselin leikkausvoiman resultantti $F_{v,Ed} = (F_{vy,Ed}^2 + F_{vz,Ed}^2)^{0,5}$	
$F_{V,Rd}$	2244 kN	Pulttien leikkauskestävyys	

$$F_{t,Rd_v} = 4039,2 \text{ kN} \quad F_{t,Rd_v} = \text{MIN}( F_{t,Rd} ( 1 - F_{v,Ed} / F_{V,Rd} ) * 1,4 * F_{t,Rd} )$$

# LIITE A: LIITOSVAIHTOEHTO 1 LUJUUSLASKELMAT

## (5.8) Reunapuristuskestävyys (PL5)

$f_{ub}$	1000	N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$f_u$	510	N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$d$	30	mm	Laippa pultin halkaisija	
$d_0$	33	mm	Laippa pultin reiän halkaisija	
$t$	20	mm	Liitoslevyn paksuus	
$A_s$	561	mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$e_1$	64	mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa	
$e_2$	64	mm	Reunaetäisyys voimaa vastaan kohtisuoraan	
$P_1$	120	mm	Pulttien väli voiman suunnassa	
$P_2$	100	mm	Pulttien väli voimaa vastaan kohtisuoraan	
$\alpha_b$	0,646	-	(levyn päässä)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$\alpha_b$	0,962	-	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_1$	2,5	-	(reunapultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_2$	2,5	-	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$l_{km}$	3	kpl	muiden pulttien lukumäärä	
$l_{km2}$	7	kpl	Reunapulttien $l_{km}$	
$\gamma_{M3}$	1,25	-	Liukumiskestävyys (luokka C)	EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$F_{s,Rd}$  3956,4 kN

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}}$$

EN 1993-1-8, taulukko 3.4

## (5.9) Reunapuristuskestävyys (PL5)

$f_{ub}$	1000	N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$f_u$	510	N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$d$	30	mm	Laippa pultin halkaisija	
$d_0$	33	mm	Laippa pultin reiän halkaisija	
$t$	20	mm	Liitoslevyn paksuus	
$A_s$	561	mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$e_1$	64	mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa	
$e_2$	64	mm	Reunaetäisyys voimaa vastaan kohtisuoraan	
$P_1$	120	mm	Pulttien väli voiman suunnassa	
$P_2$	100	mm	Pulttien väli voimaa vastaan kohtisuoraan	
$\alpha_b$	0,646	-	(levyn päässä)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$\alpha_b$	0,962	-	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_1$	2,5	-	(reunapultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_2$	2,5	-	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$l_{km}$	3	kpl	muiden pulttien lukumäärä	
$l_{km2}$	7	kpl	Reunapulttien $l_{km}$	
$\gamma_{M3}$	1,25	-	Liukumiskestävyys (luokka C)	EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$F_{s,Rd}$  3956,4 kN

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}}$$

EN 1993-1-8, taulukko 3.4

# LIITE A: LIITOSVAIHTOEHTO 1 LUJUUSLASKELMAT

## (5.10) Vipuvaikutuksen raja-arvo (PL1)

$t_{pl}$	20 mm	
$L_b$	40 mm	( $L_b=2*t_{pl}$ )
$m_f$	50 mm	
$e_f$	64 mm	
$n_f$	64 mm	
$n_{outer}$	4 kpl	
$b_{pl}$	448 mm	
$L_{eff,f}$	112 mm	
$A_s$	561 mm	
$t_f$	51,64 mm	
$x_f$	1	

## (5.10) Profiilin ulkopuoliset pultit $F_{t,1,Rd}$ (PL1)

$m_1$	50 mm
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{M0}$	1,0 -
$n_{outer}$	4 kpl
$b_{pl}$	448 mm
$L_{eff\_1}$	112 mm
$t_{pl}$	20 mm
$x_f$	1

$F_{t,1,Rd}$	159,04 kN
--------------	-----------

$N_{t,Rd}$	1800 kN
------------	---------

$n_b$	16 kpl
-------	--------

$F_{tb,Rd}$	112,5 kN
-------------	----------

$F_{tb,Ed}/F_{t,1,Rd}$	0,71
------------------------	------



(5.10) Profiilin ulkopuoliset pultit  $F_{t,2,Rd}$  (PL1)

$m_2$	50 mm
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{M0}$	1,0 -
$n_{outer}$	4 kpl
$b_{pl}$	448 mm
$L_{eff\_2}$	314,16 mm
$t_{pl}$	20 mm
$x_f$	1
$F_{t,2,Rd}$	446,11 kN
$N_{t,Rd}$	1800 kN
$n_b$	16 kpl
$F_{tb,Rd}$	112,5 kN
$F_{tb,Ed}/F_{t,2,Rd}$	0,25

(5.10) Profiilin ulkopuoliset pultit  $F_{t,3,Rd}$  (PL1)

$m_3$	50 mm
$n_f$	64 mm
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{M0}$	1,0 -
$n_{outer}$	4 kpl
$b_{pl}$	448 mm
$L_{eff\_3}$	162 mm
$t_{pl}$	20 mm
$x_f$	1
$F_{t,3,Rd}$	230,04 kN
$N_{t,Rd}$	1800 kN
$n_b$	16 kpl
$F_{tb,Rd}$	112,5 kN
$F_{tb,Ed}/F_{t,3,Rd}$	0,49

# LIITE A: LIITOSVAIHTOEHTO 1 LUJUUSLASKELMAT

## (5.10) Profiilin ulkopuoliset pultit $F_{t,4,Rd}$ (PL1)

$m_4$	50 mm
$e_{pl}$	64 mm
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{M0}$	1,0 -
$n_{outer}$	4 kpl
$b_{pl}$	448 mm
$L_{eff\_4}$	204 mm
$t_{pl}$	20 mm
$x_f$	1
$F_{t,4,Rd}$	289,7 kN

$$N_{t,Rd} = 1800 \text{ kN}$$

$$n_b = 16 \text{ kpl}$$

$$F_{tb,Rd} = 112,5 \text{ kN}$$

$$F_{tb,Ed}/F_{t,4,Rd} = 0,39$$

## (5.10) Profiilin sisäpuoliset pultit $F_{t,5,Rd}$ (PL1)

$m_5$	50 mm
$e_{pl}$	64 mm
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{M0}$	1,0 -
$n_{inner}$	4 kpl
$b_{pl}$	448 mm
$t_w$	8,5 mm
$t_f$	14 mm
$h_{prof}$	290 mm
$L_{eff\_5}$	175,38 mm
$t_{pl}$	20 mm
$x_f$	1
$F_{t,5,Rd}$	249,0 kN

$$N_{t,Rd} = 1800 \text{ kN}$$

$$n_b = 16 \text{ kpl}$$

$$F_{tb,Rd} = 112,5 \text{ kN}$$

$$F_{tb,Ed}/F_{t,5,Rd} = 0,45$$

## LIITE A: LIITOSVAIHTOEHTO 1 LUJUUSLASKELMAT

### Murtumismalli 2

#### (5.10) Profiilin sisäpuoliset pultit $F_{t,Rd\_2}$ (PL1)

$m_4$	50 mm
$n_4$	64 mm
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{M0}$	1,0 -
$n_{outer}$	4 kpl
$b_{pl}$	448 mm
$L_{eff\_4}$	204 mm
$t_{pl}$	20 mm
$F_{t,Rd}$	252,45 kN
$x_f$	1
$F_{t,Rd\_2}$	205,3 kN
$N_{t,Rd}$	1800 kN
$n_b$	16 kpl
$F_{tb,Rd}$	112,5 kN
$F_{tb,Ed}/F_{t,Rd\_2}$	0,55

### Murtumisehto

$$F_{t,Rd\_2} / F_{t,3,Rd} = 0,892248 \text{ ( >1 ehto täyttyy)}$$

Vaadittu sitkeysehto murtumismallin suhteen toteutuu

## YLÄPAARTEEN LASKENNAN TULOKSET

## YLÄPAARTEEN KESTÄVYYKSIEN YHTEENVETO

Mitoituskohta	Rasitus	Kestävyys	yksikkö	käyttöaste		
Profiilin jännitykset	350,3	355	N/mm <sup>2</sup>	0,99	OK	(a)
Hitsit (1+2+3+4) veto	1800	3969	kN	0,45	OK	(1,2,3,4)
Liukumiskestävyys	195	1257	kN	0,16	OK	(5.1)
Pulttien Veto	1800	4039	kN	0,45	OK	(5.2)
Ruuvien lävistyminen	1800	3999	kN	0,45	OK	(5.3 & 5.4)
Pulttien leikkauskestävyys	195,3	2244,0	kN	0,09	OK	(5.5)
Pulttien yhteisvaikutus	-	-	kN	0,41	OK	(5.6)
Pulttien redusoitu vetok.	1800	4039,2	kN	0,45	OK	(5.7)
Reunapuristuskestävyys	1800	3956,4	kN	0,45	OK	(5.8 & 5.9)
Levyn taipuminen	113	159,0	kN	0,71	OK	
Suurin käyttöaste				0,99		

## PROFIILIN P5 POIKKILEIKKAUSARVOJA

$\Sigma A$	11250 mm <sup>2</sup>
$\Sigma A_{Vz}$	2227 mm <sup>2</sup>
$\Sigma A_{Vy}$	8400 mm <sup>2</sup>
$W_y$	1260 cm <sup>3</sup>
$W_z$	420,6 cm <sup>3</sup>

## KUORMITUS: [ ALAPAARRE ]

$N_{Ed}$	1800	kN	Normaalivoima (+ = puristus)
$V_{z,Ed}$	240	kN	Leikkausvoima uuman suuntaan
$V_{y,Ed}$	125	kN	Leikkausvoima laipan suuntaan
$M_{y,Ed}$	60	kNm	Momentti vahvaan suuntaan
$M_{z,Ed}$	60	kNm	Momentti heikkoon suuntaan

## ALAPAARTEEN HITSIT

Kohta	Hitsi tyyppi	a-mitta	Tarkennus
1	Piena mp	5	molemmin puolin, railoitettuna 0,5 ... 1 mm
2	Piena mp	5	molemmin puolin, railoitettuna 0,5 ... 1 mm
3	Piena mp	5	molemmin puolin, railoitettuna 0,5 ... 1 mm
4	Puoli V tasalle	14	Tasaluja hitsi on hiottu tasalle

## YLÄPAARTEEN TASALUJEN HITSIEN JÄNNITYKSET (= profiilin jännitykset)

Normaalivoima

[kaikki pisteet]

$N_{Ed}$	$\Sigma A$	$\sigma_N$
kN	mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1800	11250	160,0

$$\sigma_N = \frac{N_{Ed}}{A}$$

Leikkausvoima (z)

[piste 4]

$V_{z,Ed}$	$\Sigma A_{Vz}$	$\sigma_{Vz}$
kN	mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
240	2227	186,7

$$\sigma_{Vz} = \frac{V_{z,max}}{A_{Vz}} = \frac{\sqrt{3} * V_{z,Ed}}{2 * b_{PL3} * t_{PL3}}$$

Leikkausvoima (y)

[pisteet 2, 6]

$V_{y,Ed}$	$\Sigma A_{Vy}$	$\sigma_{Vy}$
kN	mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
125	8400	14,9

$$\sigma_{Vy} = \frac{V_{y,max}}{A_{Vy}} = \frac{\sqrt{3} * V_{y,Ed}}{2 * b_{PL1} * t_{PL1}}$$

Momentti (y)

(+) [pisteet 5,6,7]

(-) [pisteet 1,2,3]

$M_{y,Ed}$	$W_y$	$+\sigma_{My}$	$-\sigma_{My}$
kNm	cm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
60	1260	47,6	-47,6

$$\sigma_{My} = \frac{M_{y,Ed}}{W_y}$$

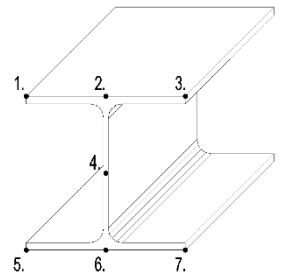
Momentti (z)

(+) [pisteet 3,7]

(-) [pisteet 1,5]

$M_{z,Ed}$	$W_z$	$+\sigma_{Mz}$	$-\sigma_{Mz}$
kNm	cm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
60	421	142,7	-142,7

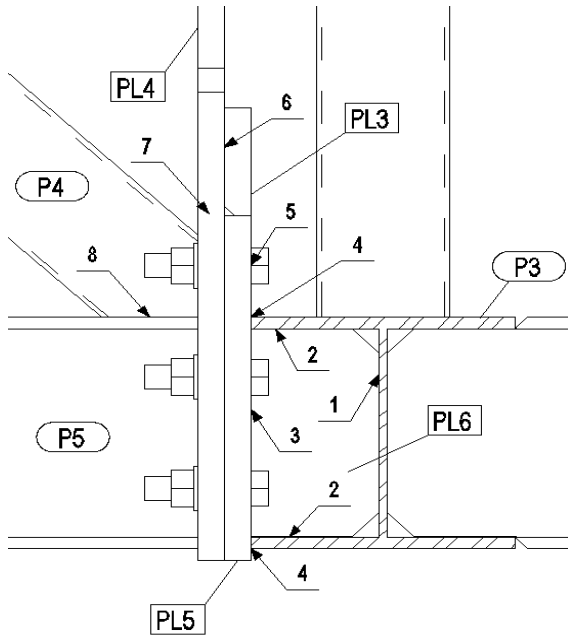
$$\sigma_{Mz} = \frac{M_{z,Ed}}{W_z}$$



status	Tarkastelupiste	$\sigma_N$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{Vz}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{Vy}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{My}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{Mz}$ N/mm <sup>2</sup>	$\Sigma \sigma$ N/mm <sup>2</sup>	$\pm \sigma_{vertailu}$ N/mm <sup>2</sup>	käyttöaste
OK	1	160,0	0	0	-47,6	-142,7	-30,3	355	0,09
OK	2	160,0	0	14,9	-47,6	0	127,3	355	0,36
OK	3	160,0	0	0	-47,6	142,7	255,0	355	0,72
OK	4	160,0	186,7	0	0	0	346,7	355	0,98
OK	5	160,0	0	0	47,6	-142,7	65,0	355	0,18
OK	6	160,0	0	14,9	47,6	0	222,5	355	0,63
OK	7	160,0	0	0	47,6	142,7	350,3	355	0,99

Suurin käyttöaste 0,99

## ALAPAARTEEN OSIEN MITOITUS



## MITOITETTAVAT ASIAT

- 1) Jäykistelevyn hitsin kestävyys
- 2) Jäykistelevyn hitsin kestävyys
- 3) Jäykistelevyn hitsin kestävyys
- 4) Profiilien laippahitsien kestävyys
- 5.1) Liukumiskestävyys
- 5.2) Pulttien vetokapasiteetti
- 5.3) Ruuvien ja mutterien lävistymisen (PL5)
- 5.4) Ruuvien ja mutterien lävistymisen (PL4)
- 5.5) Pulttien leikkauskestävyys
- 5.6) Pulttien yhteisvaikutus leikkaukselle ja vedolle
- 5.7) Pulttien vetokestävyys (redusoitu)
- 5.8) Levyn (PL5) reunapuristuskestävyys
- 5.9) Levyn (PL4) reunapuristuskestävyys
- 5.10) Levyn taivutus (PL5)

## (1) Hitsien kestävyys

$L_w$	396 mm
$a$	5 mm
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>
$\beta_w$	0,9 -
$\gamma_{M2}$	1,25 -

Hitsin pituus ( $L_w = (d_{p2} - 10\text{mm}) \cdot 2$ )

Pienahitsi molemmin puolin ( $a = t_{w,PL7} / 2$ , pyör. ylös)

Heikoimman osan vetomurtolujuus

EN 1993-1-1, taulukko 3.1

Korrelaatiokerroin

EN 1993-1-8, taulukko 4.1

Hitsien osavarmuus

EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$$F_{w,Rd} = 518,2 \text{ kN}$$

$$F_{w,Rd} = \frac{L_w \cdot a \cdot f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot \sqrt{3}}$$

EN 1993-1-8, kaavat 4.3 ja 4.4

## (2) Hitsien kestävyys

$L_w$	467 mm
$a$	5 mm
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>
$\beta_w$	0,9 -
$\gamma_{M2}$	1,25 -

Hitsin pituus (kaksi laippa, molemmin puolin) ( $L_w = 2 \cdot 2 \cdot (b_{p2}/2 - t_{w,P2}/2 - r - 2)$ )

Pienahitsi molemmin puolin ( $a = t_{w,PL7} / 2$ , pyör. ylös)

Heikoimman osan vetomurtolujuus

EN 1993-1-1, taulukko 3.1

Korrelaatiokerroin

EN 1993-1-8, taulukko 4.1

Hitsien osavarmuus

EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$$F_{w,Rd} = 611,1 \text{ kN}$$

$$F_{w,Rd} = \frac{L_w \cdot a \cdot f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot \sqrt{3}}$$

EN 1993-1-8, kaavat 4.3 ja 4.4

(3) Hitsien kestävyys

$L_w$	524 mm	Hitsin pituus ( $L_w = h_{IP2} * 2$ )	
$a$	5 mm	Pienahitsi molemmin puolin ( $a = t_{PL7} / 2$ , pyör. ylös)	
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Heikoimman osan vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$\beta_w$	0,9 -	Korrelaatiokerroin	EN 1993-1-8, taulukko 4.1
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Hitsien osavarmuus	EN 1993-1-8, taulukko 2.1
$F_{w,Rd}$	685,7 kN	$F_{w,Rd} = \frac{L_w * a * f_u}{\beta_w * \gamma_{M2} * \sqrt{3}}$	EN 1993-1-8, kaavat 4.3 ja 4.4

(4) Hitsien kestävyys

$L_w$	896 mm	Hitsin pituus ( $L_w = 2 * b_{PL1}$ )	
$a$	14 mm	Tasaluja puoli V hitsi hiottu tasalle. ( $a = t_{r,P2}$ )	
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Heikoimman osan vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$\beta_w$	0,9 -	Korrelaatiokerroin	EN 1993-1-8, taulukko 4.1
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Hitsien osavarmuus	EN 1993-1-8, taulukko 2.1
$F_{w,Rd}$	3283,2 kN	$F_{w,Rd} = \frac{L_w * a * f_u}{\beta_w * \gamma_{M2} * \sqrt{3}}$	EN 1993-1-8, kaavat 4.3 ja 4.4

(5.1) Liukumiskestävyys

$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$d$	24 mm	Pultin halkaisija	
$A_s$	353 mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$F_{p,C}$	247 kN	Esijännitysvoima	EN 1993-1-8, kaavat 3.7
$k_s$	1 -	Normaalit pyöreät reiät	EN 1993-1-8, Taulukko 3.6
$n$	1 -	Kitkapintojen lukumäärä	
$\mu$	0,4 -	Kitkakerroin (luokka B)	EN 1993-1-8, Taulukko 3.7
$l_{km}$	10 kpl	Pulttien lukumäärä	
$\gamma_{M3}$	1,25 -	Liukumiskestävyys (luokka C)	EN 1993-1-8, taulukko 2.1
$F_{s,Rd}$	790,7 kN	$F_{s,Rd} = \frac{k_s * n * \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C}$	EN 1993-1-8, kaavat 3.6

(5.2) Pulttien vetokestävyys

$k_2$	0,9 -	Kerroin	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$d_0$	26 mm	Pultin reiän halkaisija	
$A_{s,i}$	353 mm <sup>2</sup>	Yhden pultin poikkipinta-ala	
$n_b$	10 kpl	Pulttien lukumäärä	
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Pulttien osavarmuusluku	EN 1993-1-8, taulukko 2.1
$F_{t,Rd}$	2541,6 kN		

(5.3) Pulttien ja mutterin lävistyminen (PL5)

$d_m$	33 mm	Pultin reiän halkaisija
$t_p$	20 mm <sup>2</sup>	Levyn paksuus
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus
$n_b$	10 kpl	Pulttien lukumäärä
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Pulttien osavarmuusluku
$B_{p,Rd}$	5075,8 kN	(Kaikkien pultit yhteensä)

EN 1993-1-8, taulukko 2.1

(5.4) Pulttien ja mutterin lävistyminen (PL4)

$d_m$	33 mm	Pultin reiän halkaisija
$t_p$	20 mm <sup>2</sup>	Levyn paksuus
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus
$n_b$	16 kpl	Pulttien lukumäärä
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Pulttien osavarmuusluku
$B_{p,Rd}$	8121,3 kN	

EN 1993-1-8, taulukko 2.1

(5.5) Pulttien leikkauskestävyys

$\alpha$	0,5 mm	Kerroin
$d$	30 mm	Pultin halkaisija
$A_s$	561 mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)
$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus
$n_b$	16 kpl	Pulttien lukumäärä
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Pulttien osavarmuusluku
$F_{V,Rd}$	3590,4 kN	

EN 1993-1-8, taulukko 3.4

EN 1993-1-8, taulukko 3.1

EN 1993-1-8, taulukko 2.1

(5.6) Yhdistetty leikkaus- ja vetovoima

$F_{vz,Ed}$	240 kN	Leikkausvoima (uuman suuntaan)
$F_{vy,Ed}$	125 kN	Leikkausvoima (laippojen suuntaan)
$F_{v,Ed}$	271 kN	Kahden akselin leikkausvoiman resultantti $F_{v,Ed} = (F_{vy,Ed}^2 + F_{vz,Ed}^2)^{0,5}$
$F_{t,Ed}$	1800 kN	Vetovoima
$F_{t,Rd}$	2542 kN	Pulttien vetokestävyys
$F_{V,Rd}$	3590 kN	Pulttien leikkauskestävyys

$$YVE = 0,58 - \frac{F_{v,Ed}}{F_{V,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1,0$$

EN 1993-1-8, taulukko 2.1

(5.7) Pulttien vetokestävyys (reduoitu)

$F_{t,Rd}$	2542 kN	Pulttien vetokestävyys	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$F_{v,Ed}$	271 kN	Kahden akselin leikkausvoiman resultantti $F_{v,Ed} = (F_{vy,Ed}^2 + F_{vz,Ed}^2)^{0,5}$	
$F_{V,Rd}$	3590 kN	Pulttien leikkauskestävyys	
$F_{t,Rd_v}$	2541,6 kN	$F_{t,Rd_v} = \text{MIN}(F_{t,Rd} \cdot (1 - F_{v,Ed} / F_{V,Rd}) \cdot 1,4 \cdot F_{t,Rd})$	



(5.8) Reunapuristuskestävyys (PL5)

$f_{ub}$	1000	N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$f_u$	510	N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$d$	30	mm	Laippa pultin halkaisija	
$d_0$	33	mm	Laippa pultin reiän halkaisija	
$t$	20	mm	Liitoslevyn paksuus	
$A_s$	561	mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$e_1$	64	mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa	
$e_2$	64	mm	Reunaetäisyys voimaa vastaan kohtisuoraan	
$P_1$	120	mm	Pulttien väli voiman suunnassa	
$P_2$	100	mm	Pulttien väli voimaa vastaan kohtisuoraan	
$\alpha_b$	0,646	-	(levyn päässä)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$\alpha_b$	0,962	-	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_1$	2,5	-	(reunapultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_2$	2,5	-	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
lkm	4	kpl	muiden pulttien lukumäärä	
lkm2	12	kpl	Reunapulttien lkm	
$\gamma_{M3}$	1,25	-	Liukumiskestävyys (luokka C)	EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$F_{s,Rd}$  6330,2 kN

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}}$$

EN 1993-1-8, taulukko 3.4

(5.9) Reunapuristuskestävyys (PL4)

$f_{ub}$	1000	N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$f_u$	510	N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$d$	30	mm	Laippa pultin halkaisija	
$d_0$	33	mm	Laippa pultin reiän halkaisija	
$t$	20	mm	Liitoslevyn paksuus	
$A_s$	561	mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$e_1$	64	mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa	
$e_2$	64	mm	Reunaetäisyys voimaa vastaan kohtisuoraan	
$P_1$	120	mm	Pulttien väli voiman suunnassa	
$P_2$	100	mm	Pulttien väli voimaa vastaan kohtisuoraan	
$\alpha_b$	0,646	-	(levyn päässä)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$\alpha_b$	0,962	-	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_1$	2,5	-	(reunapultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_2$	2,5	-	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
lkm	4	kpl	muiden pulttien lukumäärä	
lkm2	12	kpl	Reunapulttien lkm	
$\gamma_{M3}$	1,25	-	Liukumiskestävyys (luokka C)	EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$F_{s,Rd}$  6330,2 kN

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}}$$

EN 1993-1-8, taulukko 3.4

# LIITE A: LIITOSVAIHTOEHTO 1 LUJUUSLASKELMAT

## (5.10) Vipuvaikutuksen raja-arvo (PL5)

$t_{pl}$	20 mm	
$L_b$	40 mm	( $L_b=2*t_{pl}$ )
$m_f$	50 mm	
$e_f$	64 mm	
$n_f$	64 mm	
$n_{outer}$	4 kpl	
$b_{pl}$	448 mm	
$L_{eff,f}$	112 mm	
$A_s$	561 mm	
$t_f$	51,64 mm	
$x_f$	1	

## (5.10) Profiilin ulkopuoliset pultit $F_{t,1,Rd}$ (PL5)

$m_1$	50 mm
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{M0}$	1,0 -
$n_{outer}$	4 kpl
$b_{pl}$	448 mm
$L_{eff\_1}$	112 mm
$t_{pl}$	20 mm
$x_f$	1

$F_{t,1,Rd}$	159,04 kN
--------------	-----------

$N_{t,Rd}$	1800 kN
------------	---------

$n_b$	16 kpl
-------	--------

$F_{tb,Rd}$	112,5 kN
-------------	----------

$F_{tb,Ed}/F_{t,1,Rd}$	0,71
------------------------	------

# LIITE A: LIITOSVAIHTOEHTO 1 LUJUUSLASKELMAT

## (5.10) Profiilin ulkopuoliset pultit $F_{t,2,Rd}$ (PL5)

$m_2$	50 mm
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{M0}$	1,0 -
$n_{outer}$	4 kpl
$b_{pl}$	448 mm
$L_{eff\_2}$	314,16 mm
$t_{pl}$	20 mm
$x_f$	1
$F_{t,2,Rd}$	446,11 kN
$N_{t,Rd}$	1800 kN
$n_b$	16 kpl
$F_{tb,Rd}$	112,5 kN
$F_{tb,Ed}/F_{t,2,Rd}$	0,25

## (5.10) Profiilin ulkopuoliset pultit $F_{t,3,Rd}$ (PL5)

$m_3$	50 mm
$n_f$	64 mm
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{M0}$	1,0 -
$n_{outer}$	4 kpl
$b_{pl}$	448 mm
$L_{eff\_3}$	162 mm
$t_{pl}$	20 mm
$x_f$	1
$F_{t,3,Rd}$	230,04 kN
$N_{t,Rd}$	1800 kN
$n_b$	16 kpl
$F_{tb,Rd}$	112,5 kN
$F_{tb,Ed}/F_{t,3,Rd}$	0,49

(5.10) Profiilin ulkopuoliset pultit  $F_{t,4,Rd}$  (PL5)

$m_4$	50 mm
$e_{pl}$	64 mm
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{M0}$	1,0 -
$n_{outer}$	4 kpl
$b_{pl}$	448 mm
$L_{eff\_4}$	204 mm
$t_{pl}$	20 mm
$x_f$	1
$F_{t,4,Rd}$	289,7 kN

$$N_{t,Rd} = 1800 \text{ kN}$$

$$n_b = 16 \text{ kpl}$$

$$F_{tb,Rd} = 112,5 \text{ kN}$$

$$F_{tb,Ed}/F_{t,4,Rd} = 0,39$$

(5.10) Profiilin sisäpuoliset pultit  $F_{t,5,Rd}$  (PL5)

$m_5$	50 mm
$e_{pl}$	64 mm
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{M0}$	1,0 -
$n_{inner}$	4 kpl
$b_{pl}$	448 mm
$t_w$	8,5 mm
$t_f$	14 mm
$h_{prof}$	290 mm
$L_{eff\_5}$	175,38 mm
$t_{pl}$	20 mm
$x_f$	1
$F_{t,5,Rd}$	249,0 kN

$$N_{t,Rd} = 1800 \text{ kN}$$

$$n_b = 16 \text{ kpl}$$

$$F_{tb,Rd} = 112,5 \text{ kN}$$

$$F_{tb,Ed}/F_{t,5,Rd} = 0,45$$

## LIITE A: LIITOSVAIHTOEHTO 1 LUJUUSLASKELMAT

### Murtumismalli 2

#### (5.10) Profiilin sisäpuoliset pultit $F_{t,Rd\_2}$ (PL5)

$m_4$	50 mm
$n_4$	64 mm
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>
$\gamma_{M0}$	1,0 -
$n_{outer}$	4 kpl
$b_{pl}$	448 mm
$L_{eff\_4}$	204 mm
$t_{pl}$	20 mm
$F_{t,Rd}$	158,85 kN
$x_f$	1
$F_{t,Rd\_2}$	152,7 kN
$N_{t,Rd}$	1800 kN
$n_b$	16 kpl
$F_{tb,Rd}$	112,5 kN
$F_{tb,Ed}/F_{t,Rd\_2}$	0,74

### Murtumisehto

$$F_{t,Rd\_2} / F_{t,3,Rd} = 0,66382 \text{ ( >1 ehto täyttyy)}$$

Vaadittu sitkeysehto murtumismallin suhteen toteutuu

## ALAPAAARTEEN LASKENNAN TULOKSET

## ALAPAAARTEEN KESTÄVYYKSIEN YHTEENVETO

Mitoituskohta	Rasitus	Kestävyys	yksikkö	käyttöaste		
Profiilin jännitykset	350,3	355	N/mm <sup>2</sup>	0,99	OK	(a)
Hitsit (1+2+3+4) veto	1800	3969	kN	0,45	OK	(1,2,3,4)
Liukumiskestävyys	271	791	kN	0,34	OK	(5.1)
Pulttien Veto	1800	2542	kN	0,71	OK	(5.2)
Ruuvien lävistyminen	1800	5076	kN	0,35	OK	(5.3 & 5.4)
Pulttien leikkauskestävyys	270,6	3590,4	kN	0,08	OK	(5.5)
Pulttien yhteisvaikutus	-	-	kN	0,58	OK	(5.6)
Pulttien redusoitu vetok.	1800	2541,6	kN	0,71	OK	(5.7)
Reunapuristuskestävyys	1800	6330,2	kN	0,28	OK	(5.8 & 5.9)
Levyn taipuminen	113	152,7	kN	0,74	OK	
Suurin käyttöaste				0,99		

## LIITOSTEN KUSTANNUSLASKENTA

Det 4 [ Leikkauspalaliitos ]

Levyosat	PL1	PL2	PL3	PL4	PL5	PL6	PL7
h [mm]	518	100	380	1106	588	433	260
b [mm]	448	300	135	888	440	440	145
t [mm]	20	15	30	20	30	20	10
Teräs	S355	S355	S355	S355	S355	S355	S355
A [mm <sup>2</sup> ]	502768	144000	133500	2044016	579120	415960	83500

## MATERIAALI (LEVYT)

Levyosat	PL1	PL2	PL3	PL4	PL5	PL6	PL7	
[kg/kpl]	36,2	3,5	12,0	153,2	60,5	29,7	2,9	
[kpl]	1	2	1	1	1	1	1	
W <sub>SMPi</sub>	36,20	7,02	12,00	153,21	60,54	29,72	2,94	kg
C <sub>SMBPI</sub>	1,169	1,169	1,169	1,169	1,169	1,169	1,169	€/kg
C <sub>SMBG</sub>	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	€/kg
C <sub>SMT</sub>	0,012	0	0,012	0,012	0,012	0,012	0,023	€/kg
C <sub>SMQ</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	€/kg
C <sub>SMTQ</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	€/kg
C <sub>SMUT</sub>	0,069	0,069	0,069	0,069	0,069	0,069	0,069	€/kg
C <sub>SMi</sub>	46,52	8,94	15,43	196,88	77,79	38,19	3,81	€

Levyjen materiaali kustannukset

C <sub>SM</sub>	387,56	€
-----------------	--------	---

## SUIHKUPUHDISTUS

Levyosat	PL1	PL2	PL3	PL4	PL5	PL6	PL7
C <sub>B1</sub>	0,19	0,07	0,14	0,40	0,21	0,16	0,09
tehokkuus	3	3	3	3	3	3	3
C <sub>B</sub>	0,06	0,02	0,05	0,13	0,07	0,05	0,03

Suihkupuhdistuksen kustannukset

C <sub>B</sub>	0,42	€
----------------	------	---

## LEVYJEN LEIKKAUS (plasma/polttoleikkaus)

Levyosat	PL1	PL2	PL3	PL4	PL5	PL6	PL7
$L_{cu}$ [mm/kpl]	1932	800	1030	3988	2056	1746	810
[mm]	1932	1600	1030	3988	2056	1746	810
Plasma							
$T_{PCu}$ [min]	0,97	0,56	0,65	2,01	1,30	0,88	0,19
$C_{cu}$ (€)	5,73	4,98	5,15	7,61	6,33	5,56	4,31
$\Sigma C_{cu}$	39,67	€					
Polttoleikkaus							
$T_{PCu}$ [min]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$C_{CCu}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$C_{cu}$ (€)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\Sigma C_{cu}$	0,00	€					

Levyjen leikkauksen kokonaiskustannukset

$C_{cu}$	39,67	€
----------	-------	---

## PORAUS

## PL1

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	1	2	3	4	
$t_1$ [mm]	30	20	20	20	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	4	4	4	4	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,3	0,3	0,3	0,3	$(n_r - 1) \cdot 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,81	0,54	0,54	0,54	
$T_{PD}$	2,44	min			

Tuottava aika [ $T_{ND}$ ]

$r_i$	4	kpl	Porattavia rivejä
$\Sigma n_{il}$	1,20		$\Sigma(n_r - 1) \cdot 0,1$
$L$	518	mm	Kappaleen pituus
$v$	0,03	min	Kappaleen siirtymäaika kuljettimella
$T_{ND}$	7,08	min	

Materiaalikulut [poranterät]

$P_{DB}$	167,00	€	Poranterän hinta
$C_{cD}$	0,90	€/min	Kustannukset poranterästä

Porauksen kustannukset (PL1)

$C_D$	14,90	€
-------	-------	---



## PL4

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	1	2	3	4	5	6	7
$t_1$ [mm]	30	20	20	20	20	20	20
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	33	33
$n_r$ [kpl]	4	4	2	4	4	4	4
$n_{il}$ [kpl]	0,3	0,3	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3
$T_{pdk}$ [min]	0,81	0,54	0,27	0,54	0,54	0,54	0,54
$T_{PD}$	3,79 min						

Tuottava aika [ $T_{ND}$ ]

$r_i$	7	kpl	Porattavia rivejä
$\Sigma n_{il}$	1,90		$\Sigma(n_r - 1) \cdot 0,1$
L	1106	mm	Kappaleen pituus
v	0,06	min	Kappaleen siirtymäaika kuljettimella
$T_{ND}$	9,01	min	

## Materiaalikulut [poranterät]

$P_{DB}$	167,00	€	Poranterän hinta
$c_{cD}$	1,41	€/min	Kustannukset poranterästä

## Porauksen kustannukset (PL4)

$C_D$	22,43	€
-------	-------	---

## PL5

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	1	2	3	
$t_1$ [mm]	30	20	20	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	Porattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	4	4	4	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,3	0,3	0,3	$(n_r - 1) \cdot 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,81	0,54	0,54	
$T_{PD}$	1,90 min			

Tuottava aika [ $T_{ND}$ ]

$r_i$	3	kpl	Porattavia rivejä
$\Sigma n_{il}$	0,90		$\Sigma(n_r - 1) \cdot 0,1$
L	588	mm	Kappaleen pituus
v	0,03	min	Kappaleen siirtymäaika kuljettimella
$T_{ND}$	6,38	min	

## Materiaalikulut [poranterät]

$P_{DB}$	167,00	€	Poranterän hinta
$C_{cD}$	0,70	€/min	Kustannukset poranterästä

## Porauksen kustannukset (PL5)

$C_D$	12,38	€
-------	-------	---

## Levyjen porausten kustannukset

$C_D$	49,71	€
-------	-------	---

## PROFIILIEN LÄHTÖTIEDOT

Profiilit	P1	P4	P5
Profiilit	HEA300	RHS180*6	HEA300
h [mm]	290	180	290
b [mm]	300	180	300
tf [mm]	14	6	14
tw [mm]	8,5	6	8,5
Ah [mm <sup>2</sup> ]	2465	2160	2465
At [mm <sup>2</sup> ]	11250	4083	11250
Teräs	S355	S355	S355
Viiste1	0	1	0
Viiste2	0	1	0
L [mm]	8000	800	8000

## SAHAUS

Profiilit	P1	P4	P5		
$T_{NS}$	4,9	6,54	4,9	min	
h (=b)	300	180	300	mm	
S	77,5	97,7	77,5	mm/min	
Sm	0,9	0,9	0,9	-	Materiaalikerroin
Q	8800	8800	8800	mm <sup>2</sup> /min	Materiaalikerroin
$T_{PS}$	8,88	4,34	8,88	min	
St	6826248	5505192	6826248	mm <sup>2</sup>	
$p_{SB}$	150	150	150	€/kpl	Sahanterän yksikköhinta
$C_{CS}$	0,056	0,051	0,056	€/min	Sahanterän kustannukset €/min
$C_{si}$	17,21	13,36	17,21	€	

## Sahauksen kokonaiskustannus

$C_s$	47,78	€
-------	-------	---

## PORAUS

Profiileissa ei ole reikiä

Porausten kustannukset

$C_D$	0,00	€
-------	------	---

## LOVEUS

Profiileissa ei ole loveuksia

Porausten kustannukset

$C_{Co}$	0,00	€
----------	------	---

## KOKOONPANO

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Osien lkm	10 kpl
$T_{PTak}$	1,59 min/kpl
$T_{PTa}$	15,9 min

Hitsaus	piena				puoli V			
	a mm	Lfw mm	$T_{Pfw}$ min	$C_{CPA}$ €	b mm	$L_{bw}$ mm	$T_{Pbw}$ min	$C_{CPA}$ €
PL1	5	524	6,40	0,65	14	896	43,80	4,38
PL2	5	798	9,63	0,99	14	0	0,00	0,00
PL3	8	270	8,58	0,86	7	380	4,64	0,46
PL4	7	786	18,90	1,92	14	1200	58,67	5,86
PL5	6	520	9,20	0,93	14	896	43,80	4,38
PL6	5	862	10,38	1,07	14	0	0,00	0,00
PL7	5	862	10,38	1,07	14	0	0,00	0,00
$\Sigma$		4622	73,48	7,51		3372	150,91	15,08

$T_{PTa}$	15,9 min
$T_{Pfw}$	73,48 min
$T_{Pbw}$	150,91 min

Hitsauksen kustannukset

$C_{PA}$	154,59 €
----------	----------

Pulttaus

Liitoksessa ei ole konepajalla tehtäviä pulttauksia.

## JÄLKIKÄSITTELY JA TARKASTUKSET

$L_{PT}$	9663 mm	Levyt + Profiilit (1m matkalta)
$L_{UT}$	555 mm	(12% tarkastuslaajuus)
$L_{MT}$	405 mm	(12% tarkastuslaajuus)

Jälkikäsitteilyn ja tarkastusten kustannukset

$C_{PT}$	44,18 €
----------	---------

## MAALAUUS

Vain liitoslevyjen maalauskustannukset huomioidaan tässä laskennassa.

Maalausjärjestelmä: EP160/3-FeSa2½ (kustannuslaskennassa)

Maalauskustannukset

$n_f$	3 lkm	Maalikerrosten lukumäärä
$A$	3902864 mm <sup>2</sup>	Levyjen maalauspinna-ala
$C_p$	17,13 €	Maalauksen kustannukset

Kuivumiskustannukset

Ei huomioida liitosten kustannusvertailussa (kummatkin ovast samat)

Maalauksen kustannukset

$C_p$	17,13 €
-------	---------

## KULJETUS

Kuljetuskustannuksia ei tutkita liitosten kustannusvertailussa.

Kuljetuksen kustannukset

$C_T$	0,00 €
-------	--------

## ASENNUS

## KIINNIKKEET:

Materiaali: pultit

(DIN933, 8.8)	kpl	€/kpl	€
M30*120	26	8,82	229,32

Materiaali: mutterit

(DIN934-8/10)	kpl	€/kpl	€
M30*120	26	1,49	38,77

Materiaali: aluslevyt

(DIN7989)	kpl	€/kpl	€
M30*120	52	0,99	51,32

Kiinnikkeiden kokonaiskustannus

C<sub>PF1</sub> 319,41 €

n <sub>bi</sub>	26 kpl	Kiinnikkeiden lukumäärä
T <sub>Ej</sub>	12,58 min	Kiinnittämiseen kuluva aika

C <sub>LE</sub>	2,6 €/min	Työntekijäkustannukset
C <sub>SE</sub>	0,5 €/min	Työmaaparakkien kiinteät kulut
C <sub>EqE1</sub>	1,96 €/min	Nostimen vuokraus (80t)
C <sub>EqE2</sub>	1,225 €/min	Henkilönostin (30m)

Asennuksen kokonaiskustannukset

C<sub>E</sub> 398,48 €

## DET4. LEIKKAUSPALALIITOKSEN KUSTANNUSTEN YHTEENVETO

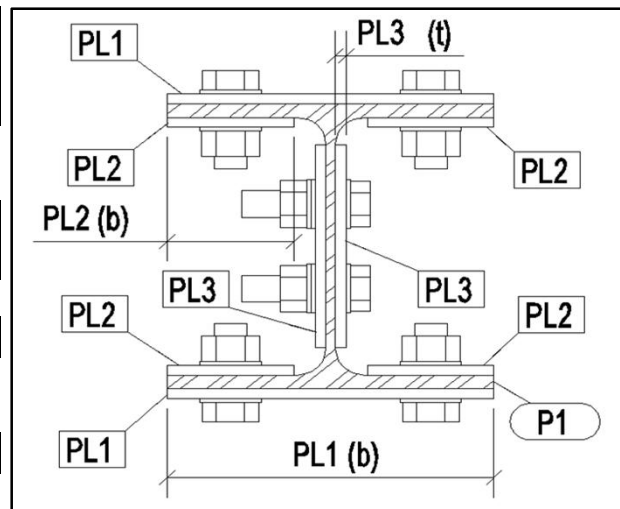
C <sub>SM</sub>	387,56 €	Levyn materiaalien kustannus
C <sub>B</sub>	0,42 €	Levyjen suihkupuhdistuksen kustannukset
C <sub>cu</sub>	39,67 €	Levyjen leikkauskustannukset
C <sub>D</sub>	49,71 €	Poraus (vain levyissä on reikiä)
C <sub>SM</sub>	47,78 €	Profiilin sahaus
C <sub>co</sub>	0,00 €	Profiilin loveus (ei ole lovia)
C <sub>PA</sub>	154,59 €	Kokoonpano
C <sub>PT</sub>	44,18 €	Jälkikäsittelyt ja tarkastukset
C <sub>P</sub>	17,13 €	Maalaus kustannukset (vain levyjen maalaus)
C <sub>T</sub>	0,00 €	Kuljetuskustannukset (ei huomioida liitosvertailussa)
C <sub>E</sub>	398,48 €	Asennuskustannukset (sis. Kiinnikkeiden hinnat)

C <sub>T</sub>	1139,52 €	Liitoksen kustannusvaikutukset
----------------	-----------	--------------------------------

# DET 14. LIITOKSEN LÄHTÖTIEDOT

## YLÄPAARRE

PROFIILIT	HEA300	Rako c:	2
		Profiilien teräslaji:	S355
LAIPAT		Levyjen teräslaji:	S355
LEVYT	h	b	t
PL1	1060	300	10
PL2	1060	118	10
PULTIT	M30	4014	10,9
	Pulttien lkm (per profiili)	x-suunta	z-suunta
		5	2
UUMA			



LEVYT	h	b	t
PL3	530	206	10
PULTIT	koko	ISO	Lujuus
	M24	4014	10,9

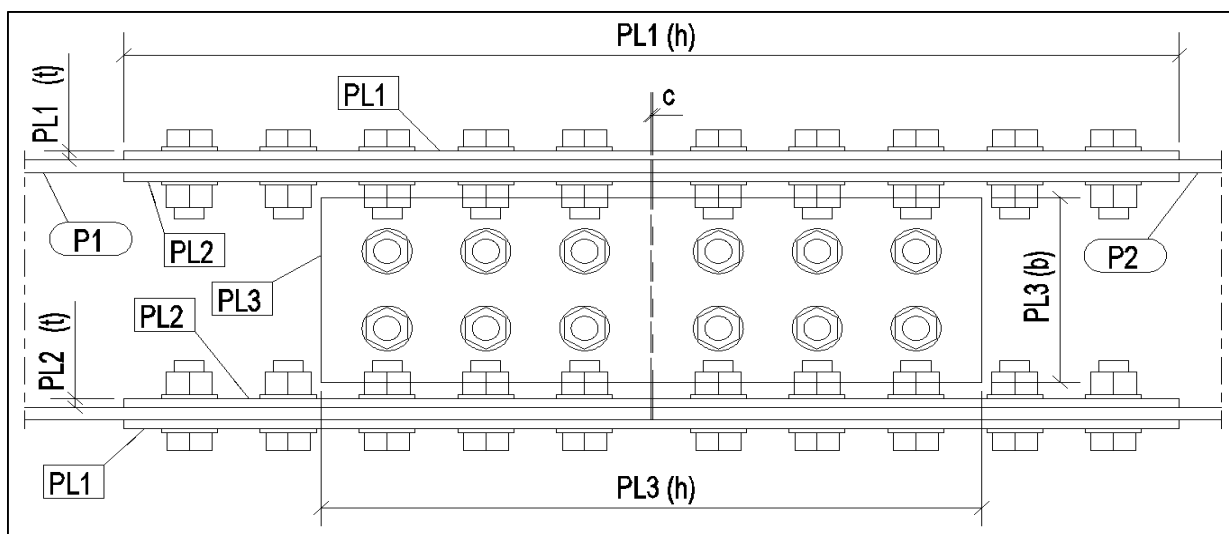
	x-suunta	z-suunta
lkm	3	2

## RASITUKSET

$N_{Ed}$	1800	kN	Normaalivoima (+ = puristus)
$V_{z,Ed}$	150	kN	Leikkausvoima uuman suuntaan
$V_{y,Ed}$	125	kN	Leikkausvoima laipan suuntaan
$M_{y,Ed}$	60	kNm	Momentti vahvaan suuntaan
$M_{z,Ed}$	60	kNm	Momentti heikkoon suuntaan

## TULOKSET

OK 0,81 KÄYTTÖASTE



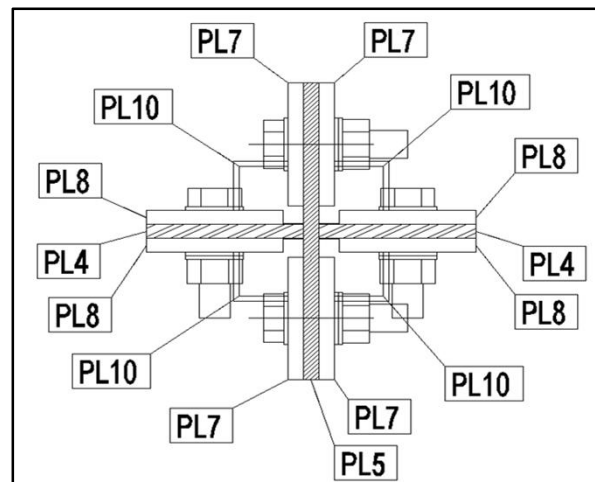
Huom!

Pulttien kiinnitysluokka: C

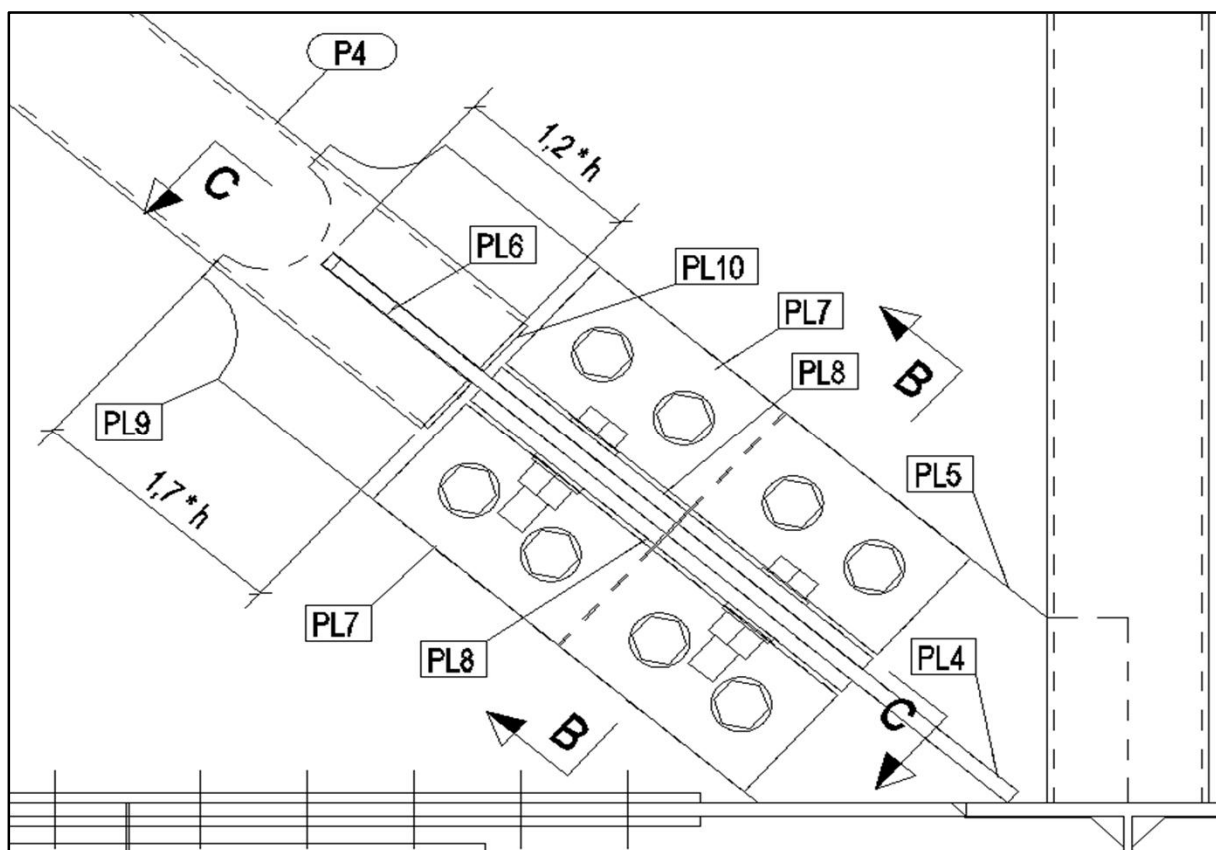
(Liukumisen kestävät esijännitetyt pultit leikkausliitoksessa)

**DET 14. LIITOKSEN LÄHTÖTIEDOT**
**DIAGONAALI**

PROFIILI	CFRHS 180x180x6		
	Profiilien teräslaji: S355		
	Levyjen teräslaji: S355		
LEVYT	h	b	t
PL4	420	x 160	x 15
PL5	560	x 319	x 15
PL6	462	x 152	x 15
PL7	464	x 140	x 10
PL8	464	x 140	x 10
PL9	552	x 319	x 15
PL10	79	x 79	x 5
PULTIT	koko	ISO	Lujuus
	M30	4014	10,9


**RASITUKSET**
**TULOKSET**
 $N_{Ed}$  1500 kN Aksiaalinen kuormitus (+ = puristus)

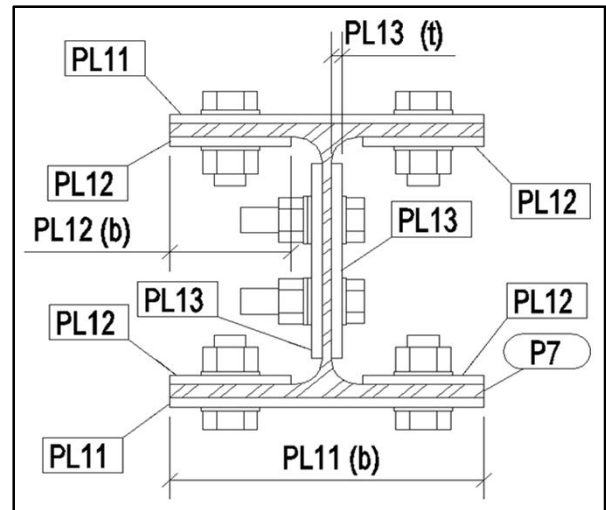
OK 0,99 KÄYTTÖASTE



Huom! Pulttien kiinnitysluokka: C (liukumisen kestävät esijännitetyt pultit leikkausiitoksessa)

**DET 14. LIITOKSEN LÄHTÖTIEDOT**
**ALAPAAARRE**

PROFIILIT	HEA300	Rako c:	2
		Profiilien teräslaji:	S355
LAIPAT		Levyjen teräslaji:	S355
LEVYT	h	b	t
PL11	1060	300	10
PL12	1060	118	10
PULTIT	M30	4014	10,9
	Pulttien lkm (per profiili)	x-suunta	z-suunta
		5	2
UUMA			

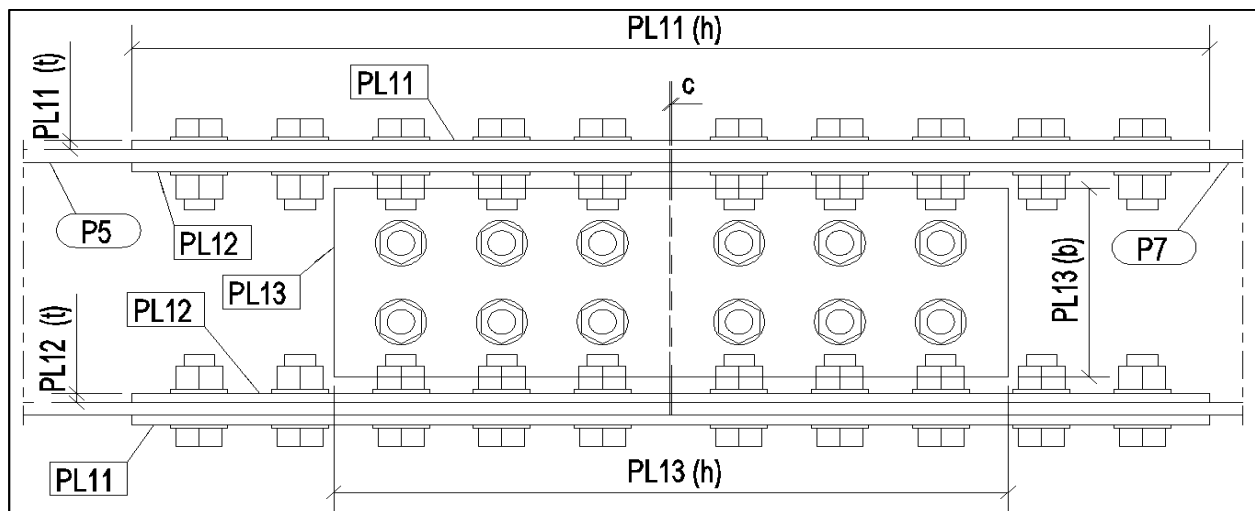


LEVYT	h	b	t
PL13	530	206	10
PULTIT	koko	ISO	Lujuus
	M24	4014	10,9

	x-suunta	z-suunta
lkm	3	2

**RASITUKSET**
**TULOKSET**

$N_{Ed}$	1800	kN Aksiaalinen kuormitus (+ = puristus)
$V_{z,Ed}$	150	kN Leikkausvoima uuman suuntaan
$V_{y,Ed}$	240	kN Leikkausvoima laipan suuntaan
$M_{y,Ed}$	60	kNm Momentti vahvaan suuntaan
$M_{z,Ed}$	60	kNm Momentti heikkoon suuntaan

OK **0,81** KÄYTTÖASTE


Huom!

Pulttien kiinnitysluokka: C

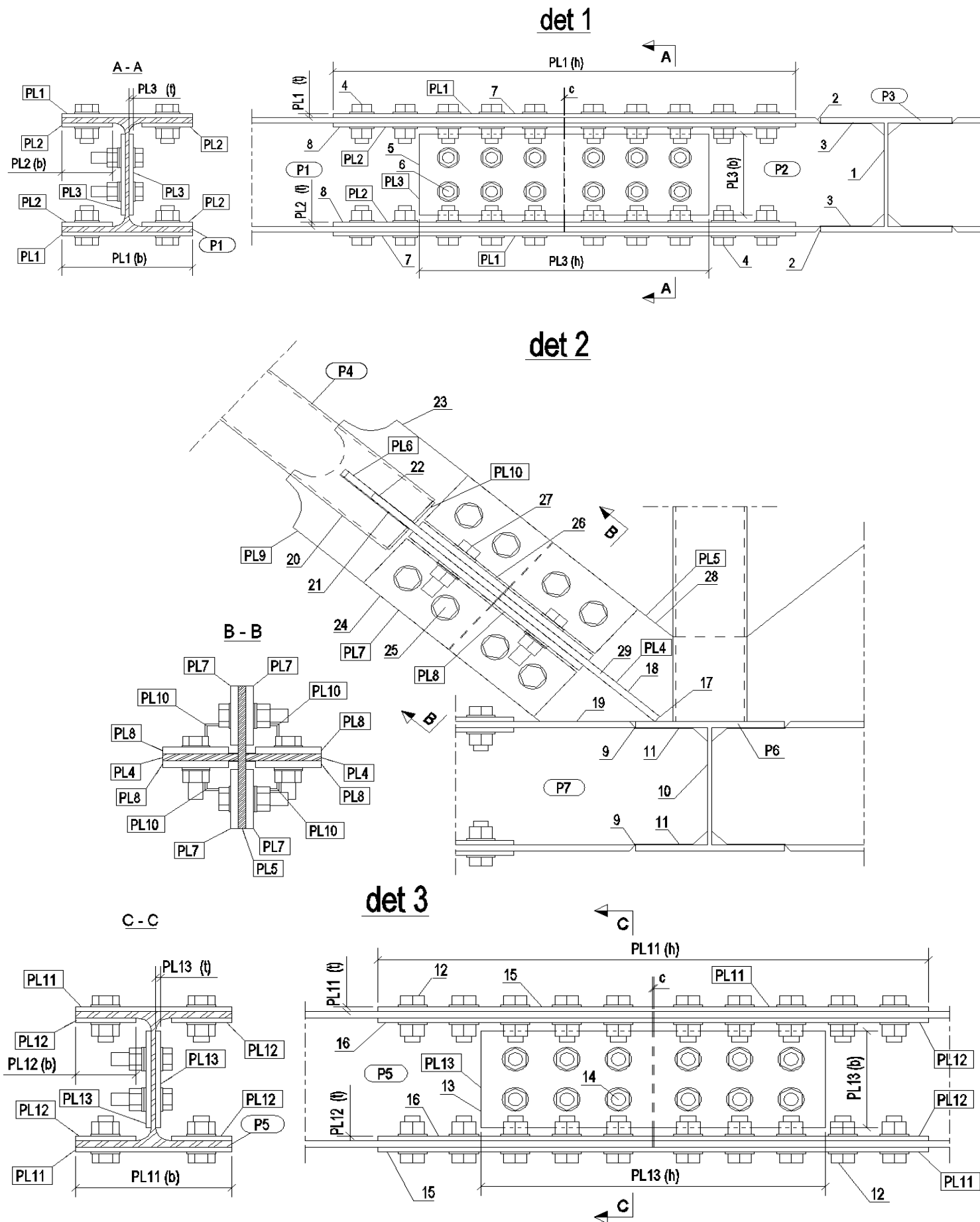
(Liukumisen kestävät esijännitetyt pultit leikkausliitoksessa)





## LIITE C: LIITOSVAIHTOEHTO 2 LUJUUSLASKELMAT

## LIITOKSEN DETALJIT, OSIEN JA MITOITUSTEN NUMEROINTI



# LIITE C: LIITOSVAIHTOEHTO 2 LUJUUSLASKELMAT

## PROFIILIT

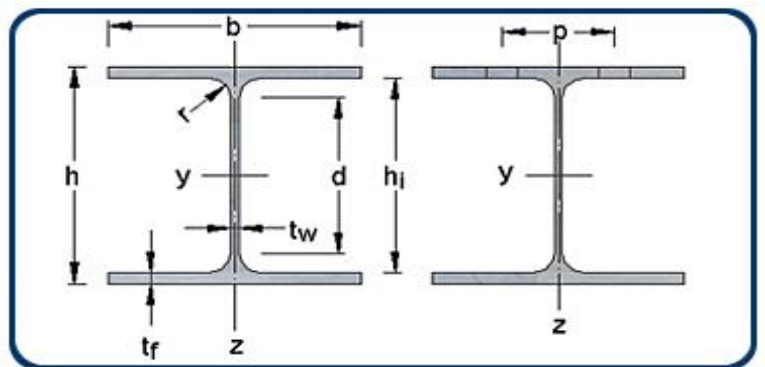
Tunnus	Profiili	h	b	t <sub>w</sub>	t <sub>f</sub>	r	A	h <sub>i</sub>	d
-	-	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm ]	[ mm <sup>2</sup> ]	[ mm ]	[ mm ]
P1	HEA300	290	300	8,5	14	27	11250	262	208
P2	HEA300	290	300	8,5	14	27	11250	262	208
P3	HEA300	290	300	8,5	14	27	11250	262	208
P4	CFRHS 180x180x6	180	180	12,5	12,5	37,5	7704	155	105
P5	HEA300	290	300	8,5	14	27	11250	262	208
P6	HEA300	290	300	8,5	14	27	11250	262	208
P7	HEA300	290	300	8,5	14	27	11250	262	208

Profiilien materiaali (SFS-EN10025-2)

Profiili	teräslaji
YLÄPAARRE	S355
DIAGONAALI	S355
ALAPAARRE	S355

Profiilien välinen rako ( c )

YLÄPAARRE	2	mm
ALAPAARRE	2	mm



Profiilin mittojen selitykset.

## KIINNIKKEET

Kiinnityskohta	koko	EN ISO	lujuus	d	d <sub>0</sub>
Yläpaarteen laipat	M30	4014	10,9	30	33
Yläpaarteen uuma	M24	4014	10,9	24	26
Diagonaali	M30	4014	10,9	30	33
Alapaarteen laipat	M30	4014	10,9	30	33
Alapaarteen uuma	M24	4014	10,9	24	26

## LIITOSLEVYT

Levy	tunnus	h	b	t	lkm	Teräs	f <sub>u</sub>	f <sub>y</sub>
Laippalevyt	PL1	1060	300	10	2	S355	510	355
Laippalevyt	PL2	1060	118	10	4	S355	510	355
Uumalevyt	PL3	530	206	10	2	S355	510	355
Sidelevy (puolikas)	PL4	420	160	15	2	S355	510	355
Sidelevyt	PL5	560	319	15	1	S355	510	355
Sidelevy (puolikas)	PL6	462	152	15	2	S355	510	355
Poskilevyt	PL7	464	140	10	4	S355	510	355
Poskilevyt	PL8	464	140	10	4	S355	510	355
Sidelevy	PL9	552	319	15	1	S355	510	355
Tulppalevyt	PL10	79	79	5	4	S355	510	355
Laippalevyt	PL11	1060	300	10	2	S355	510	355
Laippalevyt	PL12	1060	118	10	4	S355	510	355
Uumalevyt	PL13	530	206	10	2	S355	510	355

Laskija: Ville Jokela

pvm: 22.5.2016

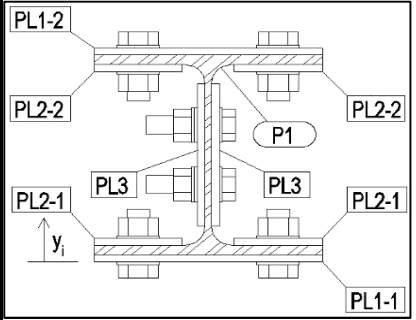
## Liitoslevyjen poikkileikkausarvot

Levy	tunnus	m [ kg ]	A mm <sup>2</sup>	W <sub>y</sub> cm <sup>3</sup>	I <sub>y</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>z</sub> cm <sup>3</sup>	I <sub>z</sub> cm <sup>4</sup>
Laippalevy	PL1	24,9	3000	5,0	2,5	150,0	2250,0
Laippalevy	PL2	9,8	1180	2,0	1,0	23,2	136,9
Uumalevy	PL3	8,6	2060	70,7	728,5	3,4	1,7
Sidelevy (puolikas)	PL4	7,9	2400	6,0	4,5	64,0	512,0
Sidelevy	PL5	21,0	4785	254,4	4057,7	12,0	9,0
Sidelevy (puolikas)	PL6	8,3	2280	5,7	4,3	57,8	439,0
Poskilevy	PL7	5,1	1400	32,7	228,7	2,3	1,2
Poskilevy	PL8	5,1	1400	2,3	1,2	32,7	228,7
Sidelevy	PL9	20,7	4785	254,4	4057,7	12,0	9,0
Tulppalevy	PL10	0,2	0	0,0	0,0	0,0	0,0
Laippalevy	PL11	24,9	3000	5,0	2,5	150,0	2250,0
Laippalevy	PL12	9,8	1180	2,0	1,0	23,2	136,9
Uumalevy	PL13	8,6	2060	70,7	728,5	3,4	1,7

## Liitoslevyjen yhteiset poikkileikkausarvot

[ y-suunta ]

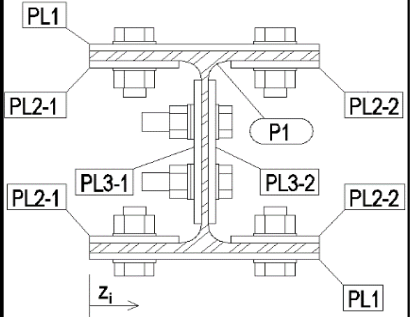
Osa	A <sub>i</sub> mm <sup>2</sup>	y <sub>i</sub> mm	A <sub>i</sub> y <sub>i</sub> cm <sup>3</sup>	A <sub>i</sub> y <sub>0</sub> <sup>2</sup> cm <sup>4</sup>	I <sub>yi</sub> cm <sup>4</sup>
PL1-1	3000	5	15	6750	2,5
PL2-1 (x2)	2360	29	68,44	3747	2,0
PL3 (x2)	4120	155	638,6	0	1457,0
PL2-2 (x2)	2360	281	663,16	3747	2,0
PL1-2	3000	305	915	6750	2,5
Σ	14840		2300,2	20993	1466



y <sub>0</sub>	155	mm	I <sub>y</sub>	22459	cm <sup>4</sup>
y <sub>max</sub>	155	mm	W <sub>y</sub>	1449,0	cm <sup>3</sup>

[ z-suunta ]

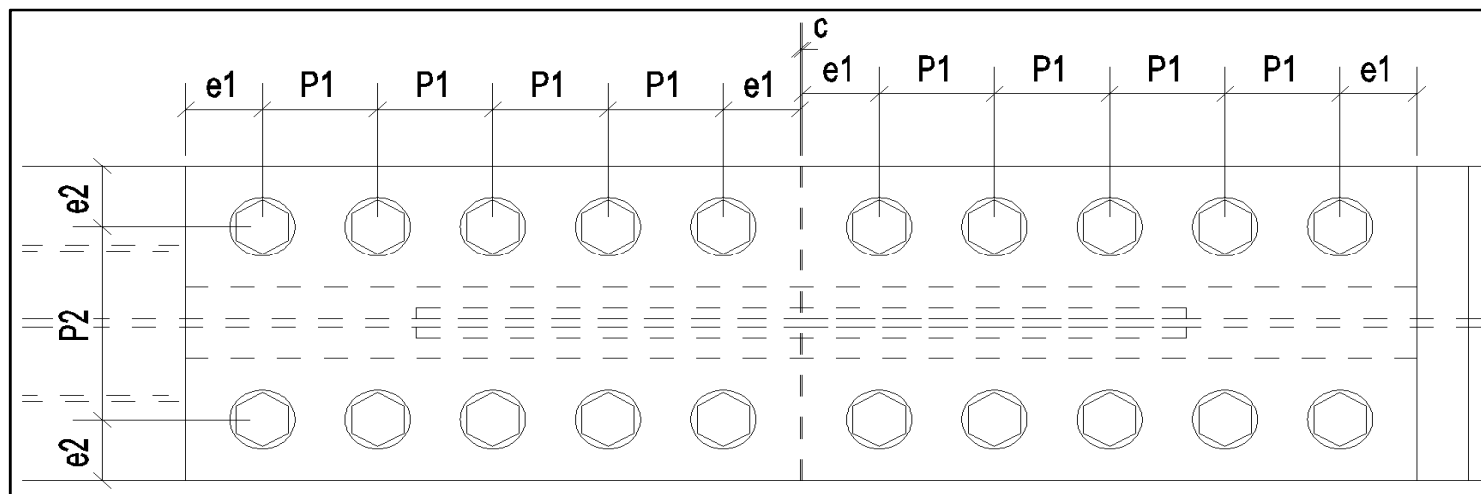
Osa	A <sub>i</sub> mm <sup>2</sup>	z <sub>i</sub> mm	A <sub>i</sub> z <sub>i</sub> cm <sup>3</sup>	A <sub>i</sub> z <sub>0</sub> <sup>2</sup> cm <sup>4</sup>	I <sub>zi</sub> cm <sup>4</sup>
PL1 (x2)	6000	150	900	0,0	4500
PL2-1 (x2)	2360	59	139,2	1954,3	274
PL3-1	2060	140,75	289,9	17,6	2
PL2-2 (x2)	2360	241	568,8	1954,3	274
PL3-2	2060	159,25	328,1	17,6	3
Σ	14840		2226	3943,9	5053



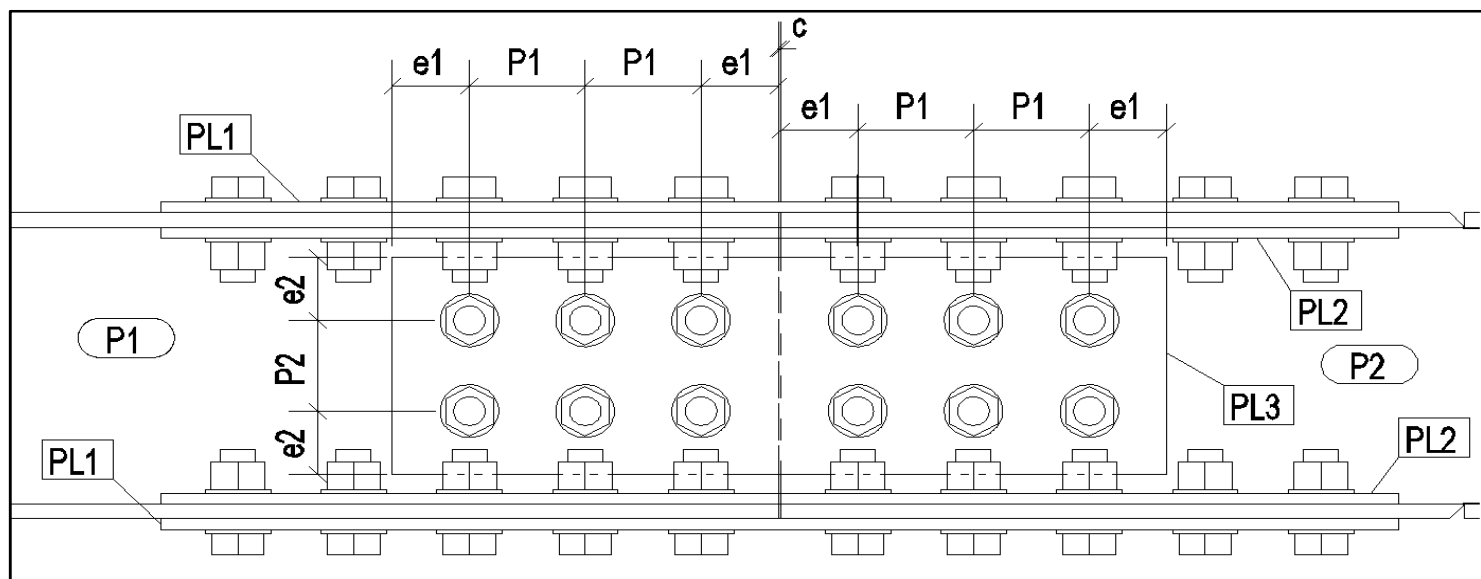
z <sub>0</sub>	150	mm	I <sub>z</sub>	8997	cm <sup>4</sup>
z <sub>max</sub>	150	mm	W <sub>z</sub>	599,8	cm <sup>3</sup>

## YLÄPAARTEEN MITOITUS

## PULTTIEN REUNAETÄISYYDET



Levy	tunnus	e1	p1	e2	p2	p2 min
Laippalevyt	PL1	66	99	59	182	118
		OK	OK	OK	OK	OK
Laippalevyt	PL2	66	99	59	0	0
		OK	OK	OK	OK	OK

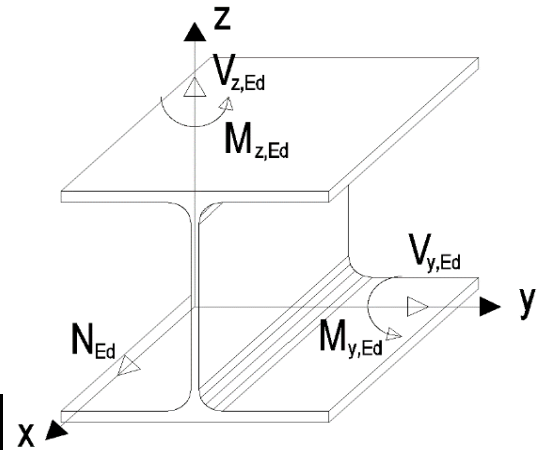


Levy	tunnus	e1	p1	e2	p2
Uumalevyt	PL3	54	78	64	78
		OK	OK	OK	OK

# LIITE C: LIITOSVAIHTOEHTO 2 LUJUUSLASKELMAT

## KUORMITUS: [ YLÄPAARRE ]

$N_{Ed}$	1800	kN	Normaalivoima (+ = puristus)
$V_{z,Ed}$	150	kN	Leikkausvoima uuman suuntaan
$V_{y,Ed}$	125	kN	Leikkausvoima laipan suuntaan
$M_{y,Ed}$	60	kNm	Momentti vahvaan suuntaan
$M_{z,Ed}$	60	kNm	Momentti heikkoon suuntaan



## YLÄPAARTEEN LIITOSLEVYJEN KESTÄVYYDET

Levy	tunnus	Puristus	Leikkaus	Leikkaus	Momentti	
		$N_{c,Rd}$ kN	$V_{y,Rd}$ kN	$V_{z,Rd}$ kN	$M_{y,Rd}$ kNm	$M_{z,Rd}$ kNm
Laippalevy	PL1	1065	615	0		
Laippalevy	PL2	419	242	0		
Uumalevyt	PL3	731	0	422		
	$\Sigma$	2215	857	422	514	213
		OK	OK	OK	OK	OK

## YLÄPAARTEEN LIITOSLEVYJEN JÄNNITYKSET

### Normaalivoima

[kaikki pisteet]

$N_{Ed}$	$\Sigma A$	$\sigma_N$
kN	mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1800	14840	121,3

$$\sigma_N = \frac{N_{Ed}}{A}$$

### Leikkausvoima (z)

[piste 4]

$V_{z,Ed}$	$\Sigma A_{Vz}$	$\sigma_{Vz}$
kN	mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
150	4120	63,1

$$\sigma_{Vz} = \frac{V_{z,max}}{A_{Vz}} = \frac{\sqrt{3} * V_{z,Ed}}{2 * b_{PL3} * t_{PL3}}$$

### Leikkausvoima (y)

[pisteet 2, 6]

$V_{y,Ed}$	$\Sigma A_{Vy}$	$\sigma_{Vy}$
kN	mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
125	6000	20,8

$$\sigma_{Vy} = \frac{V_{y,max}}{A_{Vy}} = \frac{\sqrt{3} * V_{y,Ed}}{2 * b_{PL1} * t_{PL1}}$$

### Momentti (y)

(+) [pisteet 5,6,7]

(-) [pisteet 1,2,3]

$M_{y,Ed}$	$W_y$	$+\sigma_{My}$	$-\sigma_{My}$
kNm	cm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
60	1449	41,4	-41,4

$$\sigma_{My} = \frac{M_{y,Ed}}{W_y}$$

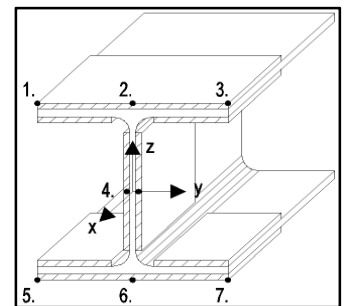
### Momentti (z)

(+) [pisteet 3,7]

(-) [pisteet 1,5]

$M_{z,Ed}$	$W_z$	$+\sigma_{Mz}$	$-\sigma_{Mz}$
kNm	cm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
60	600	100,0	-100,0

$$\sigma_{Mz} = \frac{M_{z,Ed}}{W_z}$$



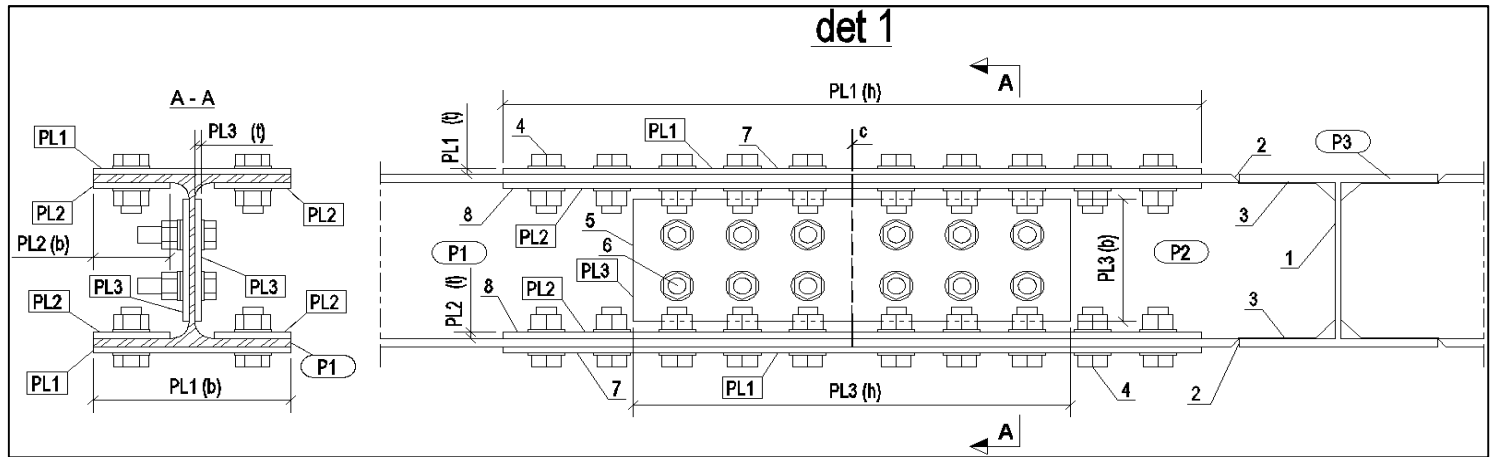
status	Tarkastelupiste	$\sigma_N$	$\sigma_{Vz}$	$\sigma_{Vy}$	$\sigma_{My}$	$\sigma_{Mz}$	$\Sigma \sigma$	$\pm \sigma_{vertailu}$	käyttöaste
		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
OK	1	121,3	0	0	-41,4	-100,0	-20,2	355	0,06
OK	2	121,3	0	20,8	-41,4	0	100,7	355	0,28
OK	3	121,3	0	0	-41,4	100,0	179,9	355	0,51
OK	4	121,3	63,1	0	0	0	184,4	355	0,52
OK	5	121,3	0	0	41,4	-100,0	62,7	355	0,18
OK	6	121,3	0	20,8	41,4	0	183,5	355	0,52
OK	7	121,3	0	0	41,4	100,0	262,7	355	0,74

Laskija: Ville Jokela

pvm: 22.5.2016

## YLÄPAARTEEN HITSIT

Kohta	Hitsi tyyppi	a-mitta	Tarkennus
1	Piena mp	5	molemmin puolin, railoitettuna 0,5 ... 1 mm
2	Puoli V tasalle	14	Tasaluja hitsi on hiottu tasalle
3	Piena mp	5	molemmin puolin, railoitettuna 0,5 ... 1 mm



## (1) Hitsien kestävyys

$L_w$	396 mm	Hitsin pituus ( $L_w = (d_{p2} - 10\text{mm}) * 2$ )	
$a$	5 mm	Pienahitsi molemmin puolin ( $a = t_{w,p2} / 2$ , pyör. ylös)	
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Heikoimman osan vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$\beta_w$	0,9 -	Korrelaatiokerroin	EN 1993-1-8, taulukko 4.1
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Hitsien osavarmuus	EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$$F_{w,Rd} = 518,2 \text{ kN}$$

$$F_{w,Rd} = \frac{L_w * a * f_u}{\beta_w * \gamma_{M2} * \sqrt{3}}$$

EN 1993-1-8, kaavat 4.3 ja 4.4

## (2) Hitsien kestävyys

$L_w$	600 mm	Hitsin pituus ( $L_w = 2 * b_{p2}$ )	
$a$	14 mm	Tasaluja puoli V hitsi hiottu tasalle. ( $a = t_{f,p2}$ )	
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Heikoimman osan vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$\beta_w$	0,9 -	Korrelaatiokerroin	EN 1993-1-8, taulukko 4.1
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Hitsien osavarmuus	EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$$F_{w,Rd} = 2198,5 \text{ kN}$$

$$F_{w,Rd} = \frac{L_w * a * f_u}{\beta_w * \gamma_{M2} * \sqrt{3}}$$

EN 1993-1-8, kaavat 4.3 ja 4.4

## (3) Hitsien kestävyys

$L_w$	467 mm	Hitsin pituus (kaksi laippa, molemmin puolin) ( $L_w = 2 * 2 * (b_{p3} / 2 - t_{w,p3} / 2 - r - 2)$ )	
$a$	5 mm	Pienahitsi molemmin puolin	
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Heikoimman osan vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$\beta_w$	0,9 -	Korrelaatiokerroin	EN 1993-1-8, taulukko 4.1
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Hitsien osavarmuus	EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$$F_{w,Rd} = 611,1 \text{ kN}$$

$$F_{w,Rd} = \frac{L_w * a * f_u}{\beta_w * \gamma_{M2} * \sqrt{3}}$$

EN 1993-1-8, kaavat 4.3 ja 4.4

YLÄPAARTEEN PULTTIEN KESTÄVYYS

PL1:n liukumiskestävyys

$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$d$	30 mm	Pultin halkaisija	
$A_s$	561 mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$F_{p,C}$	393 kN	Esijännitysvoima	EN 1993-1-8, kaavat 3.7 $F_{p,C} = 0,7 * f_{ub} * A_s$
$k_s$	1 -	Normaalit pyöreät reiät	EN 1993-1-8, Taulukko 3.6
$n$	2 -	Kitkapintojen lukumäärä (kaksi laippaa)	
$\mu$	0,4 -	Kitkakerroin (luokka B)	EN 1993-1-8, Taulukko 3.7
$l_{km}$	10 kpl	Pulttien lukumäärä	
$\gamma_{M3}$	1,25 -	Liukumiskestävyys (luokka C)	EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$F_{s,Rd}$	2513,3 kN
------------	-----------

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s * n * \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C}$$

EN 1993-1-8, kaavat 3.6

PL1:n reunapuristuskestävyys

$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$d$	30 mm	(pultin halkaisija)	
$d_0$	33 mm	(reiän halkaisija)	
$t$	10 mm	Liitoslevyn paksuus	
$n$	1 -	leikkeisyys Levyt PL2 lasketaan erillisenä)	
$n_i$	2 -	laippojen lukumäärä	
$A_s$	561 mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$e_1$	66 mm	Reunaetäisyys voimansuunnassa	
$e_2$	59 mm	Reunaetäisyys voimaa vastaan kohtisuoraan	
$P_1$	99 mm	Pulttien väli voiman suunnassa	
$P_2$	182 mm	Pulttien väli voimaa vastaan kohtisuoraan	
$\alpha_b$	0,667 -	(levyn päässä)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$\alpha_b$	0,75 -	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_1$	2,5 -	(reunapultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_2$	2,5 -	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$l_{km}$	8 kpl	muiden pulttien lukumäärä	
$l_{km2}$	2 kpl	Reunapulttien $l_{km}$	
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Kestävyys osavarmuusluku	EN 1993-1-8, taulukko 2.1

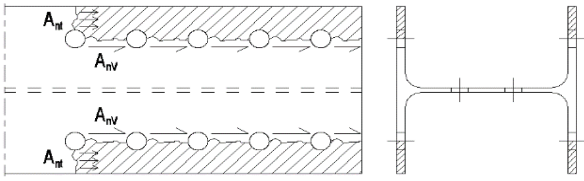
$F_{b,Rd}$	4080,0 kN
------------	-----------

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}}$$

EN 1993-1-8, taulukko 3.4



## P2:n Laipan palamurtuminen (tapaus 1)

$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>	Teräksen myötöraja	
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	
$d_0$	33 mm	Uuma pultin reiän halkaisija	
$t_f$	14 mm	Profiilin laipan paksuus	
$e_2$	59 mm	Pulttien väli voimaa vastaan kohtisuoraan	
$A_{nt}$	1456 mm <sup>2</sup>	Vedon rasittama nettopinta-ala $A_{nt} = 2 * 2 * [(e_2 - d_0) * t_w]$	
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Osavarmuus vetomurtumiselle EN 1993-1-1, 6.1 (1)	
$e_1$	66 mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa	
$p_1$	99 mm <sup>2</sup>	Pulttien väli voiman suunnassa	
$A_{nV}$	17556 mm <sup>2</sup>	Leikkauksen rasittama nettopinta-ala $A_{nV} = 2 * [2 * (e_1 + 4 * p_1 - 4,5 * d_0) * t_f]$	
$\gamma_{M0}$	1,0 -	Poikkileikkauksen osavarmuus EN 1993-1-1, 6.1 (1)	

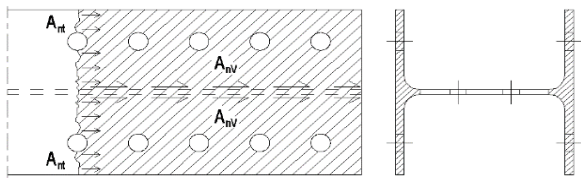
$$V_{eff,1,Rd} = f_u A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) f_y A_{nV} / \gamma_{M0}$$

$$V_{eff,1,Rd} = 4192,3 \text{ kN}$$

(sis. Molemmat laipat)

EN 1993-1-8, kaava 3.9

## P2:n Laipan palamurtuminen (tapaus 2)

$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>	Teräksen myötöraja	
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	
$r$	27 mm	Profiilin pyöristys	
$t_f$	14 mm	Profiilin laipan paksuus	
$e_2$	59 mm	Pulttien väli voimaa vastaan kohtisuoraan	
$d_0$	33 mm	Uuma pultin reiän halkaisija	
$t_w$	8,5 mm	Uuman paksuus	
$b$	300 mm	Laipan leveys	
$A_{nt}$	6552 mm <sup>2</sup>	Vedon rasittama nettopinta-ala $A_{nt} = 2 * (b * t_f - 2 * d_0 * t_f)$	
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Osavarmuus vetomurtumiselle EN 1993-1-1, 6.1 (1)	
$e_1$	66 mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa	
$p_1$	99 mm <sup>2</sup>	Pulttien väli voiman suunnassa	
$A_{nV}$	5329,5 mm <sup>2</sup>	Leikkauksen rasittama nettopinta-ala $A_{nV} = 2 * (e_1 + 4 * p_1 - 4,5 * d_0) * t_w$	
$\gamma_{M0}$	1,0 -	Poikkileikkauksen osavarmuus EN 1993-1-1, 6.1 (1)	

$$V_{eff,1,Rd} = f_u A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) f_y A_{nV} / \gamma_{M0}$$

$$V_{eff,1,Rd} = 3765,5 \text{ kN}$$

(sis. Molemmat laipat)

EN 1993-1-8, kaava 3.9

LIITE C: LIITOSVAIHTOEHTO 2 LUJUUSLASKELMAT

PL2:n liukumiskestävyys

$f_{ub}$	1000	N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$d$	30	mm	Pultin halkaisija	
$A_s$	561	mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$F_{p,C}$	393	kN	Esijännitysvoima	EN 1993-1-8, kaavat 3.7
$F_{p,C} = 0,7 * f_{ub} * A_s$				
$k_s$	1	-	Normaalit pyöreät reiät	EN 1993-1-8, Taulukko 3.6
$n$	2	-	Kitkapintojen lukumäärä (kaksi laippaa)	
$\mu$	0,4	-	Kitkakerroin	EN 1993-1-8, Taulukko 3.7
$l_{km}$	10	kpl	Pulttien lukumäärä	
$\gamma_{M3}$	1,25	-	Liukumiskestävyys (luokka C)	EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$F_{s,Rd}$	2513,3 kN
------------	-----------

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s * n * \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C}$$

EN 1993-1-8, kaavat 3.6

PL2:n reunapuristuskestävyys

$f_{ub}$	1000	N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$f_u$	510	N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$d$	30	mm	Laippa pultin halkaisija	
$d_0$	33	mm	Laippa pultin reiän halkaisija	
$t$	10	mm	Liitoslevyn paksuus	
$n$	2	-	liitoslevyä/laippa	
$n_l$	2	-	laippojen lukumäärä	
$A_s$	561	mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$e_1$	66	mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa	
$e_2$	59	mm	Reunaetäisyys voimaa vastaan kohtisuoraan	
$P_1$	99	mm	Pulttien väli voiman suunnassa	
$P_2$	0	mm	Pulttien väli voimaa vastaan kohtisuoraan	
$\alpha_b$	0,667	-	(levyn päässä)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$\alpha_b$	0,75	-	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_1$	2,5	-	(reunapultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_2$	2,5	-	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$l_{km}$	4	kpl	muiden pulttien lukumäärä	
$l_{km2}$	1	kpl	Reunapulttien $l_{km}$	
$\gamma_{M3}$	1,25	-	Liukumiskestävyys (luokka C)	EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$F_{s,Rd}$	4080,0 kN
------------	-----------

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}}$$

EN 1993-1-8, taulukko 3.4

LIITE C: LIITOSVAIHTOEHTO 2 LUJUUSLASKELMAT

PL3:n liukumiskestävyys

$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$d$	24 mm	Pultin halkaisija	
$A_s$	353 mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$F_{p,C}$	247 kN	Esijännitysvoima	EN 1993-1-8, kaavat 3.7
$F_{p,C} = 0,7 * f_{ub} * A_s$			
$k_s$	1 -	Normaalit pyöreät reiät	EN 1993-1-8, Taulukko 3.6
$n$	2 -	Kitkapintojen lukumäärä (kaksi levyä uumassa)	
$\mu$	0,4 -	Kitkakerroin	EN 1993-1-8, Taulukko 3.7
$l_{km}$	6 kpl	Pulttien lukumäärä	
$\gamma_{M3}$	1,25 -	Liukumiskestävyys (luokka C)	EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$F_{s,Rd}$	948,9 kN
------------	----------

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s * n * \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C}$$

EN 1993-1-8, kaavat 3.6

PL3:n reunapuristuskestävyys

$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$d$	24 mm	Laippa pultin halkaisija	
$d_0$	26 mm	Laippa pultin reiän halkaisija	
$t$	10 mm	Liitoslevyn paksuus	
$n$	2 -	liitoslevyä/uuma	
$n_l$	1 -	Uumien lukumäärä	
$A_s$	353 mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$e_1$	54 mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa	
$e_2$	64 mm	Reunaetäisyys voimaa vastaan kohtisuoraan	
$P_1$	78 mm	Pulttien väli voiman suunnassa	
$P_2$	78 mm	Pulttien väli voimaa vastaan kohtisuoraan	
$\alpha_b$	0,692 -	(levyn päässä)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$\alpha_b$	0,75 -	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_1$	2,5 -	(reunapultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_2$	2,5 -	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$l_{km}$	4 kpl	muiden pulttien lukumäärä	
$l_{km2}$	2 kpl	Reunapulttien lkm	
$\gamma_{M3}$	1,25 -	Liukumiskestävyys (luokka C)	EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$F_{s,Rd}$	2033,7 kN
------------	-----------

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}}$$

EN 1993-1-8, taulukko 3.4

### NURJAHDUS PULTTIEN VÄLISSÄ

Rakenteen kaarevuus on mallinnettu laskentaan seuraavasti:

Vedossa rakenne suoristuu eikä tällä katsota olevan heikentävää vaikutusta.

Puristuksessa profiileita liittävät levyt PL1, PL2 ovat kaarevia. Kaarevuus huomioidaan asettamalla nurjahduskäyräksi epävarmin (d) ja siitä seurannut epätarkkuustekijä  $\alpha = 0,76$  [EN 1993-1-1, taulukko 6.1], sekä normaalisti pulttien väliseksi nurjahduspituudeksi ( $L_c$ ) asetettu  $0,8 * L$ , kasvatetaan arvoon  $L$  ( $L=L_c$ )

Nurjahduskäyrä	$a_0$	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä $\alpha$	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

[EN 1993-1-1, taulukko 6.1: Nurjahduskäyrien epätarkkuustekijät]

#### PL1:n Nurjahdus pulttien välissä

$A_{\Sigma PL}$	14840 mm <sup>2</sup>	Liitoslevyjen poikkipinta-alojen summa
$A_{PL1}$	3000 mm <sup>2</sup>	Yksittäisen PL1:sen poikkipinta-ala
$n_A$	0,202 -	PL1:sen pinta-alan suhde kaikkien liitoslevyjen pinta-alaan ( $n_A = A_{PL1}/A_{\Sigma PL}$ )
$N_{Ed}$	1800 kN	Kaikille liitoslevyille tuleva yhteinen puristus
$N_{PL1,d}$	363,9 kN	Pinta-alojen suhteessa PL1:selle tuleva puristus ( $N_{PL1,d} = N_{Ed} * n_A$ )
c	2 mm	Profiilien välinen rako
$e_1$	54 mm	Liitoslevyn pulttien reunaetäisyys
$L_c$	110 mm	Liitoslevyn nurjahduspituus ( $L_c = e_1 + c + e_1$ )
h	10 mm	Levyn paksuus ( $h = t$ )
b	300 mm	Levyn leveys
I	2,5 cm <sup>4</sup>	Neliömomentti heikkoon suuntaan
i	2,887 mm	Hitaussäde $i = (I/A)^{0,5}$
$f_y$	335 N/mm <sup>2</sup>	Myötöraja <span style="float: right;">EN 1993-1-1, taulukko 3.1</span>
E	210000 N/mm <sup>2</sup>	Kimmokerroin
$\bar{\lambda}$	0,48 -	Suhteellinen hoikkuus $\bar{\lambda} = \frac{L_c}{(i + \pi)} * \sqrt{\frac{f_y}{E}}$
$\alpha$	0,76 -	Epätarkkuustekijä
$\phi$	0,73	$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2)$
$\chi$	0,79	$\chi = 1 / \left( \phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2} \right)$
$\gamma_{M0}$	1,0 -	Poikkileikkauksen osavarmuus <span style="float: right;">EN 1993-1-1, 6.1 (1)</span>
$N_{pl,Rd}$	794,21 kN	$N_{pl,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M0}}$
KA	0,46 -	Käyttaste [ KA ] = $N_{PL1,d} / N_{pl,Rd}$

PL2:ssa on sama käyttöaste (samat reunaetäisyydet, sama lujuusluokka, rasitus on pinta-alan suhteella.

## PL3:n Nurjahdus pulttien välissä

$A_{\Sigma PL}$	14840 mm <sup>2</sup>	Liitoslevyjen poikkipinta-alojen summa
$A_{PL3}$	2060 mm <sup>2</sup>	Yksittäisen PL3:sen poikkipinta-ala
$n_A$	0,139 -	PL3:sen pinta-alan suhde kaikkien liitoslevyjen pinta-alaan ( $n_A = A_{PL1}/A_{\Sigma PL}$ )
$N_{Ed}$	1800 kN	Kaikille liitoslevyille tuleva yhteinen puristus
$N_{PL3,d}$	249,9 kN	Pinta-alojen suhteessa PL1:selle tuleva puristus ( $N_{PL1,d} = N_{Ed} * n_A$ )
$c$	2 mm	Profiilien välinen rako
$e_1$	54 mm	Liitoslevyn pulttien reunaetäisyys
$L_c$	110 mm	Liitoslevyn nurjahduspituus ( $L_c = e_1 + c + e_1$ )
$h$	10 mm	Levyn paksuus ( $h = t$ )
$b$	206 mm	Levyn leveys
$I$	1,7 cm <sup>4</sup>	Neliömomentti heikkoon suuntaan
$i$	2,887 mm	Hitaussäde $i = (I/A)^{0,5}$
$f_y$	335 N/mm <sup>2</sup>	Myötöraja
$E$	210000 N/mm <sup>2</sup>	Kimmokerroin
$\bar{\lambda}$	0,48 -	Suhteellinen hoikkuus $\bar{\lambda} = \frac{L_c}{(i + \pi)} * \sqrt{\frac{f_y}{E}}$
$\alpha$	0,76 -	Epätarkkuustekijä
$\phi$	0,73	$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2)$
$\chi$	0,79	$\chi = 1 / \left( \phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2} \right)$
$\gamma_{M0}$	1,0 -	Poikkileikkauksen osavarmuus

EN 1993-1-1, taulukko 3.1

 $N_{pl,Rd}$  545,36 kN

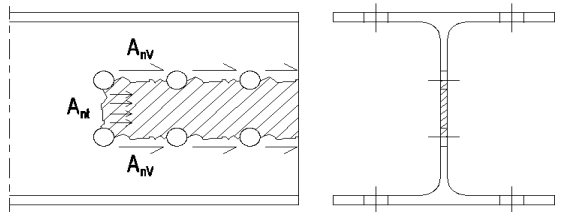
$$N_{pl,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M0}}$$

KA 0,46 -

 Käyttaste [ KA ] =  $N_{PL1,d} / N_{pl,Rd}$ 

## P2:n Uuman palamurtuminen

$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>	Myötöraja
$d_0$	26 mm	Uuma pultin reiän halkaisija
$t_w$	8,5 mm	Profiilin uuman paksuus
$p_2$	64 mm	Pulttien väli voimaa vastaan kohtisuoraan
$A_{nt}$	323 mm <sup>2</sup>	Vedon rasittama nettopinta-ala $A_{nt} = (p_2 - d_0) * t_w$
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Osavarmuus vetomurtumiselle
$e_1$	54 mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa
$p_1$	78 mm <sup>2</sup>	Pulttien väli voiman suunnassa
$A_{nV}$	2465 mm <sup>2</sup>	Leikkauksen rasittama nettopinta-ala $A_{nV} = 2 * (e_1 + p_1 + p_1 - 2,5 * d_0) * t_w$
$\gamma_{M0}$	1,0 -	Poikkileikkauksen osavarmuus



$$V_{eff,1,Rd} = f_u A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) f_y A_{nV} / \gamma_{M0}$$

 $V_{eff,1,Rd}$  637,0 kN

EN 1993-1-8, kaava 3.9

## YLÄPAARTEEN LASKENNAN TULOKSET

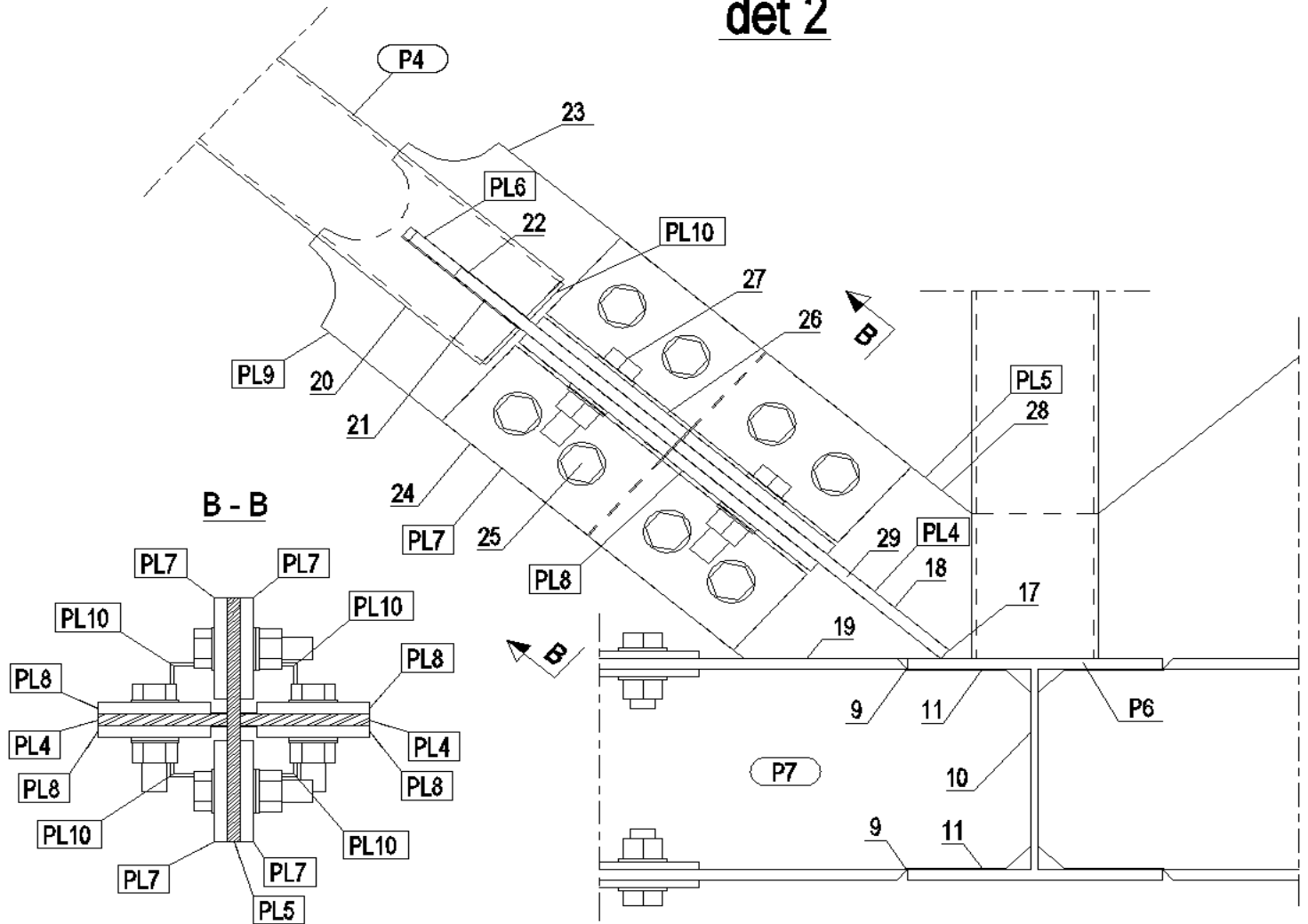
## YLÄPAARTEEN KESTÄVYYKSIEN YHTEENVETO

Mitoituskohta	Rasitus	Kestävyys	yksikkö	käyttöaste		
Levyjen normaalivoima	1800	2215	kN	0,81	OK	
Leikkaus (uuman suunta)	150	422	kN	0,36	OK	
Leikkaus (laippojen suunta)	125	857	kN	0,15	OK	
Taivutus (y-suunta)	60	514	kNm	0,12	OK	
Taivutus (z-suunta)	60	213	kNm	0,28	OK	
Levyjen summajännitykset	262,7	355	N/mm <sup>2</sup>	0,74	OK	
Hitsit (1+2+3) veto	1800	3328	kN	0,54	OK	
Pulttien Veto/puristus	1800	5975,4	kN	0,30	OK	Liukumiskestävyys
Levyjen veto/puristus	1800	10193,7	kN	0,18	OK	Reunapuristus
Profiilin veto/puristus	1800	4402,6	kN	0,41	OK	Palamurtuma
Laippalevyjen nurjahdus	364	794,2	kN	0,46	OK	Pulttien välinen nurjahdus
Uumalevyjen nurjahdus	250	545,4	kN	0,46	OK	Pulttien välinen nurjahdus
Suurin käyttöaste				0,81		

Pitkän pulttirivin leikkauskestävyyden pienennystä ei tarvitse huomioida murtorajassa liukumisen kestävässä liitoksessa (Kiinnitysluokassa C ja E ei tarkisteta kiinnikkeen leikkauskestävyyttä).

## DIAGONAALILIITOKSEN MITOITUS

det 2



## DIAGONAALIN PULTIT

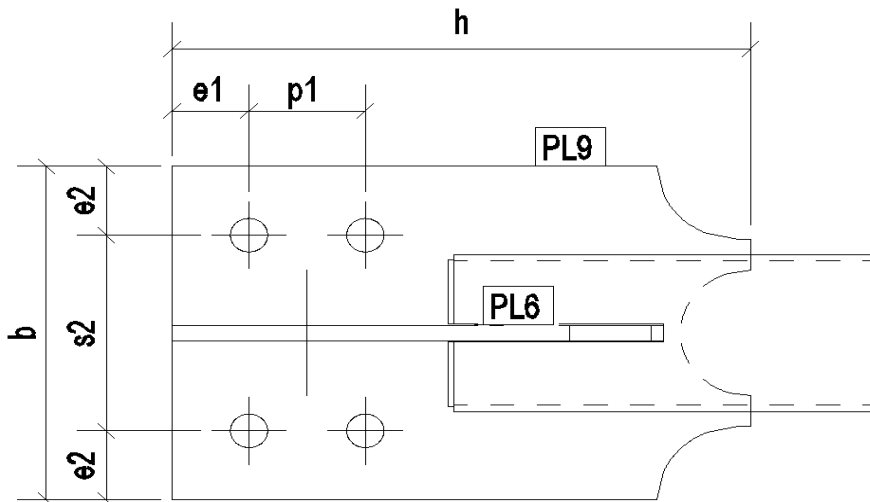
Pultti	M30	OSAKIERTEINEN PULTTI
Lujuus	10,9	
ISO	4014	

d	30 mm	Pultin nimellishalkaisija	
d <sub>0</sub>	33 mm	Reiän halkaisija	
A <sub>s</sub>	707 mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala	
f <sub>yb</sub>	900 N/mm <sup>2</sup>	Pultin myötöraja	EN1993-1-8, taulukko 3.1
f <sub>ub</sub>	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin Vetomurtolujuus	EN1993-1-8, taulukko 3.1

## RASITUKSET

N <sub>Ed</sub>	1500 kN	Aksiaalinen (puristus, veto)
-----------------	---------	------------------------------

## Profiilin sidelevy [ PL9 ]



-	2 kpl	Pultteja rivissä (kuvassa pystysuunnassa)
-	2 kpl	Pultteja jonossa (kuvassa vaakasuunnassa)
n	1 -	Leikkeisyys
t	15 mm	Levyn paksuus
b	319 mm	Levyn leveys
h	552 mm	Levyn pituus
teräs	S355	Levyn materiaali
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>	EN1993-1-1, taulukko 3.1
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	EN1993-1-1, taulukko 3.1

## Reikien geometria [ PL9 ]

Asetettu arvo

$e_1$	66 mm
$p_1$	99 mm
$e_2$	66 mm
$s_2=p_2$	187 mm

## Liukumiskestävyuden mitoitusarvo

PL9

EN1993-1-8, 3.9.1

$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN1993-1-8, taulukko 3.1
d	30 mm	Pultin halkaisija	
$A_s$	561 mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$F_{p,C}$	1571 kN	$F_{p,C} = 0,7 * f_{ub} * A_s * kpl$	
$k_s$	1 -		EN1993-1-8, taulukko 3.6
n	2 kpl	Kitkapintojen lukumäärä	
$\mu$	0,4 -	Kitkakerroin	EN1993-1-8, taulukko 3.7
$\gamma_{M3}$	1,25 -	Liukumiskestävyuden osavarmuus (kiinnitysluokka C)	EN1993-1-8, taulukko 2.1

 $F_{s,Rd}$  1005,3 kN

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s * n * \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C}$$



LIITE C: LIITOSVAIHTOEHTO 2 LUJUUSLASKELMAT

Reunapuristuskestävyys		PL9	EN1993-1-8, taulukko 3.4
$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$d$	30 mm	Pultin halkaisija	
$d_0$	33 mm	Pultin reiän halkaisija	
$t$	15 mm	Levyn paksuus	
$n$	1 -	Levyä per liitos	
$A_s$	561 mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$e_1$	66 mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa	
$e_2$	66 mm	Reunaetäisyys voimaa vastaan kohtisuoraan	
$p_1$	99 mm	Pulttien väli voiman suunnassa	
$s_2 = p_2$	187 mm	Pulttien väli voimaa vastaan kohtisuoraan	
$\alpha_b$	0,667 -	(levyn päässä)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$\alpha_b$	0,750 -	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_1$	2,5 -	(reunapultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_2$	2,5 -	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$l_{km}$	2 kpl	muiden pulttien lukumäärä	
$l_{km2}$	2 kpl	Reunapulttien $l_{km}$	
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Reunapuristuskestävyyden osavarmuusluku, EN 1993-1-8, taulukko 2.1	

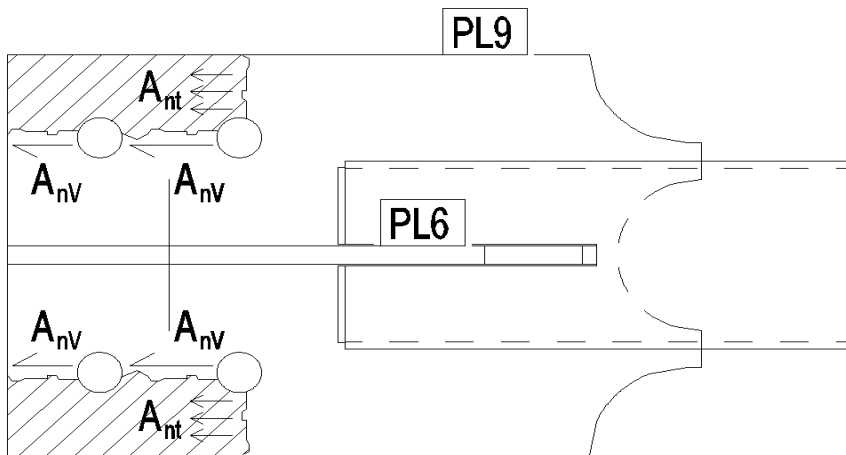
$F_{b,Rd}$	1224,0 kN	$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}}$	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
------------	-----------	---	---------------------------

Vetokestävyys		PL9	EN1993-1-1, 6.2.3(4)
$b$	319 mm	Levyn leveys	
$t$	15 mm	Levyn paksuus	
$d_0$	33 mm	Pultin reiän halkaisija	
$A_{net}$	3795 mm <sup>2</sup>	Poikkileikkauksen nettopinta-ala	$A_{net} = b * t - d_0 * t * kpl$
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>	Levyn myötöraja	EN1993-1-1, taulukko 3.1
$\gamma_{M0}$	1,0 -	Poikkileikkauksen osavarmuus	EN 1993-1-1, 6.1 (1)

$N_{net,Rd}$	1347 kN	$N_{net,Rd} = \frac{A_{net} * f_y}{\gamma_{M0}}$	EN1993-1-1, 6.2.3(4)
--------------	---------	--	----------------------

Levyn palamurtuminen

PL9



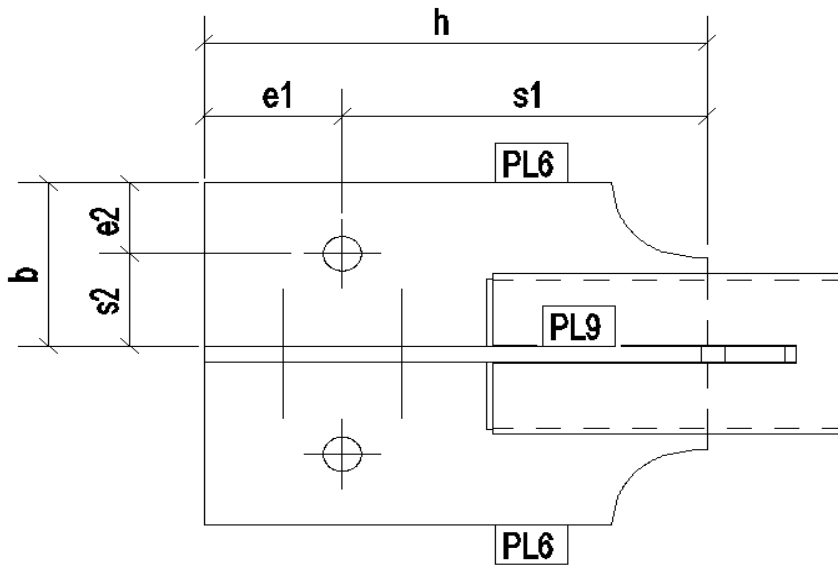
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>	Myötöraja	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$d_0$	33 mm	Pultin reiän halkaisija	
$t$	15 mm	Levyn paksuus	
$e_2$	66 mm	Reunaetäisyys voimaa vastaan kohtisuoraan	
$A_{nt}$	1485 mm <sup>2</sup>	Vedon rasittama nettopinta-ala	$A_{nt} = (2 * e_2 - d_0) * t$
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Osavarmuus vetomurtumiselle	EN 1993-1-1, 6.1 (1)
$e_1$	66 mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa	
$p_1$	99 mm <sup>2</sup>	Pulttien väli voiman suunnassa	
$A_{nv}$	3465 mm <sup>2</sup>	Leikkauksen rasittama nettopinta-ala	$A_{nv} = 2 * (e_1 + p_1 - 1,5 * d_0) * t$
$\gamma_{M0}$	1,0 -		EN 1993-1-1, 6.1 (1)

$$V_{eff,1,Rd} = f_u A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) f_y A_{nv} / \gamma_{M0}$$

 $V_{eff,1,Rd}$  1316,1 kN

EN 1993-1-8, kaava 3.9

## Profiilin sidelevyn jäykisteet [ PL6 ]



n	1 kpl	Pultteja rivissä (kuvassa pystysuunnassa)	
t	1 kpl	Pultteja jonossa (kuvassa vaakasuunnassa)	
b	2 -	Leikkeisyys	
h	15 mm	Sidelevyn paksuus	
	152 mm	Sidelevyn leveys	
	462 mm	Sidelevyn pituus	
teräs	S355	Sidelevyn materiaali	
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>	Levyn myötöraja	EN1993-1-1, taulukko 3.1
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Levyn vetomurtolujuus	EN1993-1-1, taulukko 3.1

## Reikien geometria [ PL6 ]

$e_1$	66 mm
$e_2$	66 mm
$s_2$	86 mm

## Liukumiskestävyyden mitoitusarvo

PL6

EN1993-1-8, 3.9.1

$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN1993-1-8, taulukko 3.1
d	30 mm	Pultin halkaisija	
$A_s$	561 mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala	
$F_{p,C}$	392,7 kN	$F_{p,C} = 0,7 * f_{ub} * A_s * kpl$	
$k_s$	1 -		EN1993-1-8, taulukko 3.6
n	2 kpl	Kitkapintojen lukumäärä	
$\mu$	0,4 -	Kitkakerroin	EN1993-1-8, taulukko 3.7
$\gamma_{M3}$	1,25 -	Liukumiskestävyyden osavarmuus (kiinnitysluokka C)	EN1993-1-8, taulukko 2.1

$F_{s,Rd}$	251,3 kN	(yksi levy)
$F_{s,Rd}$	502,7 kN	(kaksi levyä)

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s * n * \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C}$$

LIITE C: LIITOSVAIHTOEHTO 2 LUJUUSLASKELMAT

Reunapuristuskestävyys	PL6
------------------------	-----

EN1993-1-8, taulukko 3.4

$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$d$	30 mm	Pultin halkaisija	
$d_0$	33 mm	Pultin reiän halkaisija	
$t$	15 mm	Liitoslevyn paksuus	
$n$	2 -	Liitoslevyä per liitos	
$A_s$	561 mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$e_1$	66 mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa	
$e_2$	86 mm	Reunaetäisyys voimaa vastaan kohtisuoraan	
$P_1$	66 mm	Pulttien väli voiman suunnassa	
$s_2$	86 mm	Pulttien väli voimaa vastaan kohtisuoraan	
$\alpha_b$	0,667 -	(levyn päässä)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$\alpha_b$	0,417 -	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_1$	2,5 -	(reunapultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_2$	1,9 -	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$l_{km}$	0 kpl	muiden pulttien lukumäärä	
$l_{km2}$	1 kpl	Reunapulttien $l_{km}$	
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Reunapuristuskestävyyden osavarmuusluku, EN 1993-1-8, taulukko 2.1	

$F_{b,Rd}$	149,1 kN
$F_{b,Rd}$	298,1 kN

(yksi levy)

(kaksi levyä)

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}}$$

Vetokestävyys	PL6
---------------	-----

EN1993-1-1, 6.2.3(4)

$b$	152 mm	Levyn leveys	
$t$	15 mm	Levyn paksuus	
$d_0$	33 mm	Pultin reiän halkaisija	
$A_{net}$	1785 mm <sup>2</sup>	Poikkileikkauksen nettopinta-ala	$A_{net} = b * t - d_0 * t * kpl$
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>	Levyn myötöraja	EN1993-1-1, taulukko 3.1
$\gamma_{M0}$	1,0 -	Poikkileikkauksen osavarmuus	EN 1993-1-1, 6.1 (1)

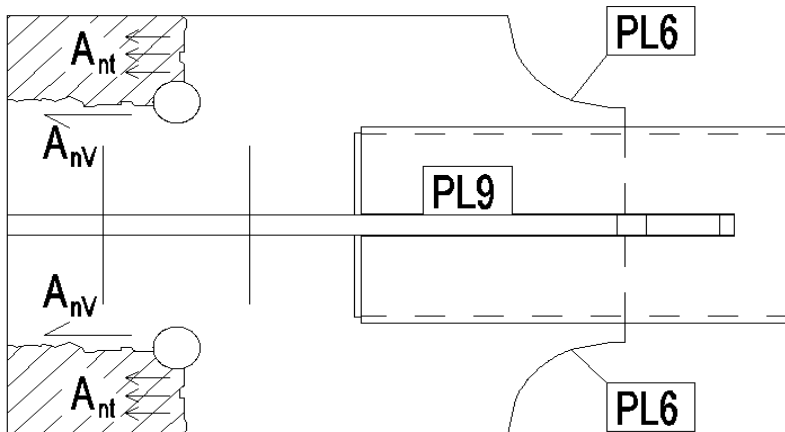
$N_{net,Rd}$	633,7 kN
$N_{net,Rd}$	1267,4 kN

(yksi levy)

(kaksi levyä)

$$N_{net,Rd} = \frac{A_{net} * f_y}{\gamma_{M0}}$$

Levyn palamurtuminen	PL6
----------------------	-----

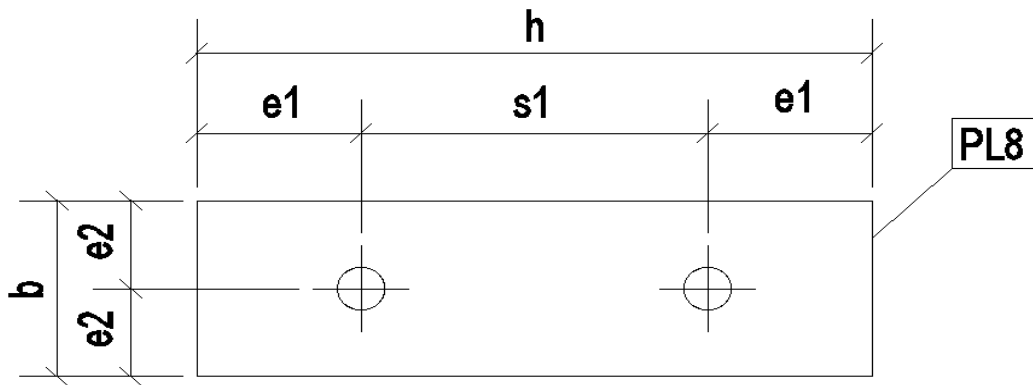


$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>	Myötöraja	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$d_0$	33 mm	Pultin reiän halkaisija	
$t$	15 mm	Levyn paksuus	
$e_2$	66 mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa	
$A_{nt}$	742,5 mm <sup>2</sup>	Vedon rasittama nettopinta-ala	$A_{nt} = (e_2 - 0,5 * d_0) * t$
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Osavarmuus vetomurtumiselle	EN 1993-1-1, 6.1 (1)
$e_1$	66 mm	Reunaetäisyys voimaa vastaan kohtisuoraan	
$A_{nv}$	742,5 mm <sup>2</sup>	Leikkauksen rasittama nettopinta-ala	$A_{nv} = (e_1 - 0,5 * d_0) * t$
$\gamma_{M0}$	1,0 -	Poikkileikkauksen osavarmuus	EN 1993-1-1, 6.1 (1)

$$V_{eff,1,Rd} = f_u A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) f_y A_{nv} / \gamma_{M0}$$

$V_{eff,1,Rd}$	455,1 kN	(yhdessä levyssä)	EN 1993-1-8, kaava 3.9
$V_{eff,1,Rd}$	910,2 kN	(kahdessa levyssä)	

## Poskilevyt [ PL8 ]



n	1 kpl	Pultteja rivissä (kuvassa pystysuunnassa)	
t	1 kpl	Pultteja jonossa (kuvassa vaakasuunnassa)	
b	1 -	Leikkeisyys	
t	10 mm	Levyn paksuus	
b	140 mm	Levyn leveys	
h	464 mm	Levyn pituus	
teräs	S355	Levyn materiaali	
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>	Levyn myötöraja	EN1993-1-1, taulukko 3.1
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Levyn vetomurtolujuus	EN1993-1-1, taulukko 3.1

## Reikien geometria [ PL8 ]

$e_1$	70 mm
$s_1$	324 mm
$e_2$	70 mm

## Liukumiskestävyyden mitoitusarvo

PL8

EN1993-1-8, 3.9.1

$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN1993-1-8, taulukko 3.1
d	30 mm	Pultin halkaisija	
$A_s$	561 mm <sup>2</sup>	Yhden pultin poikkipinta-ala	
l <sub>km</sub>	1 kpl	Pulttien lukumäärä	
$F_{p,C}$	392,7 kN	$F_{p,C} = 0,7 * f_{ub} * A_s * kpl$	
$k_s$	1 -		EN1993-1-8, taulukko 3.6
n	1 kpl	Kitkapintojen lukumäärä	
$\mu$	0,4 -	Kitkakerroin	EN1993-1-8, taulukko 3.7
$\gamma_{M3}$	1,25 -		EN1993-1-8, taulukko 2.1

$F_{s,Rd}$	125,7 kN	(yksi levy)
$F_{s,Rd}$	502,7 kN	(neljä levyä)

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s * n * \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C}$$

LIITE C: LIITOSVAIHTOEHTO 2 LUJUUSLASKELMAT

Reunapuristuskestävyys	PL8
------------------------	-----

EN1993-1-8, taulukko 3.4

$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$d$	30 mm	Pultin halkaisija	
$d_0$	33 mm	Pultin reiän halkaisija	
$t$	15 mm	Liitoslevyn paksuus	
$n$	4 -	Liitoslevyä per liitos	
$A_s$	561 mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$e_1$	70 mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa	
$e_2$	70 mm	Reunaetäisyys voimaa vastaan kohtisuoraan	
$\alpha_b$	0,707 -	(levyn päässä)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_1$	2,5 -	(reunapultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$l_{km2}$	1 kpl	Reunapulttien lkm	
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Reunapuristuskestävyyden osavarmuusluku, EN 1993-1-8, taulukko 2.1	

$F_{b,Rd}$	324,5 kN	(yksi levy)
$F_{b,Rd}$	1298,2 kN	(neljä levyä)

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}}$$

Vetokestävyys	PL8
---------------	-----

EN1993-1-1, 6.2.3(4)

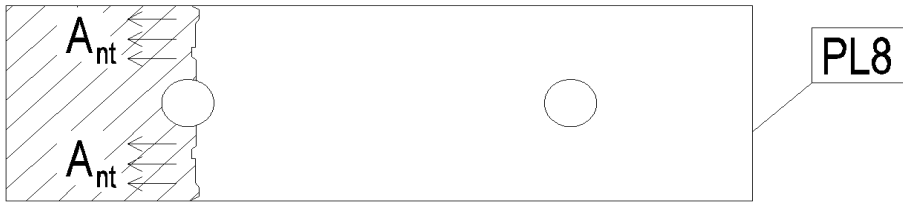
$b$	140 mm	Levyn leveys	
$t$	10 mm	Levyn paksuus	
$d_0$	33 mm	Pultin reiän halkaisija	
$A_{net}$	1070 mm <sup>2</sup>	Poikkileikkauksen nettopinta-ala	$A_{net} = b * t - d_0 * t * kpl$
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>	Levyn myötöraja	EN1993-1-1, taulukko 3.1
$\gamma_{M0}$	1,0 -	Poikkileikkauksen osavarmuus	EN 1993-1-1, 6.1 (1)

$N_{net,Rd}$	379,9 kN	(yksi levy)
$N_{net,Rd}$	1519,4 kN	(neljä levyä)

$$N_{net,Rd} = \frac{A_{net} * f_y}{\gamma_{M0}}$$

EN1993-1-1, 6.2.3(4)

Levyn palamurtuminen	PL8
----------------------	-----



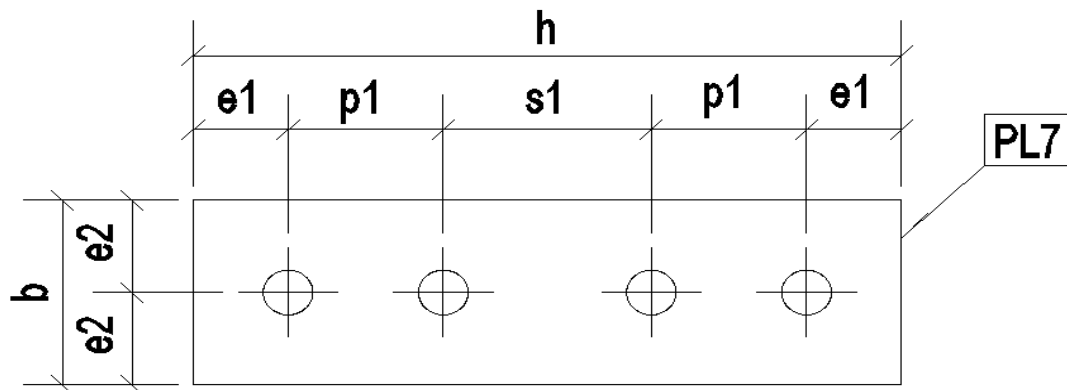
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>	Myötöraja
$d_0$	33 mm	Pultin reiän halkaisija
$t$	10 mm	Levyn paksuus
$b$	140 mm	Levyn leveys
$A_{nt}$	1070 mm <sup>2</sup>	Vedon rasittama nettopinta-ala $A_{nt} = (b - d_0) * t$
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Osavarmuus vetomurtumiselle EN 1993-1-1, 6.1 (1)
$A_{nV}$	0 mm <sup>2</sup>	Leikkauksen rasittama nettopinta-ala
$\gamma_{M0}$	1,0 -	Poikkileikkauksen osavarmuus EN 1993-1-1, 6.1 (1)

$$V_{eff,1,Rd} = f_u A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) f_y A_{nV} / \gamma_{M0}$$

$V_{eff,1,Rd}$	436,6 kN	(yksi levy)	EN 1993-1-8, kaava 3.9
$V_{eff,1,Rd}$	1746,2 kN	(neljä levyä)	



## Poskilevyt [ PL7 ]



	1 kpl	Pultteja rivissä (kuvassa pystysuunnassa)	
	2 kpl	Pultteja jonossa (kuvassa vaakasuunnassa)	
n	1	Leikkeisyys	
t	10 mm	Levyn paksuus	
b	140 mm	Levyn leveys	
h	464 mm	Levyn pituus	
teräs	S355	Levyn materiaali	
f <sub>y</sub>	355 N/mm <sup>2</sup>	Levyn myötöraja	EN1993-1-1, taulukko 3.1
f <sub>u</sub>	510 N/mm <sup>2</sup>	Levyn vetomurtolujuus	EN1993-1-1, taulukko 3.1

## Reikien geometria [ PL7 ]

e <sub>1</sub>	66 mm
p <sub>1</sub>	99 mm
e <sub>2</sub>	66 mm

## Liukumiskestävyyden mitoitusarvo

PL7

EN1993-1-8, 3.9.1

f <sub>ub</sub>	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN1993-1-8, taulukko 3.1
d <sub>0</sub>	33 mm	Pultin reiän halkaisija	
A <sub>s</sub>	561 mm <sup>2</sup>	Yhden pultin poikkipinta-ala	
l <sub>km</sub>	2 kpl	Pulttien lukumäärä	
F <sub>p,C</sub>	785,4 kN	$F_{p,C} = 0,7 * f_{ub} * A_s * kpl$	
k <sub>s</sub>	1		EN1993-1-8, taulukko 3.6
n	1	Kitkapintojen lukumäärä	
μ	0,4	Kitkakerroin	EN1993-1-8, taulukko 3.7
γ <sub>M3</sub>	1,25	Liukumiskestävyyden osavarmuus (kiinnitysluokka C)	EN1993-1-8, taulukko 2.1

F<sub>s,Rd</sub> 251,3 kN

(yksi levy)

F<sub>s,Rd</sub> 1005,3 kN

(neljä levyä)

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s * n * \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C}$$

EN1993-1-8, 3.9.1

# LIITE C: LIITOSVAIHTOEHTO 2 LUJUUSLASKELMAT

Reunapuristuskestävyys	PL7
------------------------	-----

EN1993-1-8, taulukko 3.4

$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$d$	30 mm	Pultin halkaisija	
$d_0$	33 mm	Pultin reiän halkaisija	
$t$	15 mm	Levyn paksuus	
$n$	1 -	Levyä per liitos	
$A_s$	561 mm <sup>2</sup>	Yhden pultin poikkipinta-ala	
$e_1$	66 mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa	
$e_2$	66 mm	Reunaetäisyys voimaa vastaan kohtisuoraan	
$P_1$	99 mm	Pulttien väli voiman suunnassa	
$P_2$	0 mm	Pulttien väli voimaa vastaan kohtisuoraan	
$\alpha_b$	0,667 -	(levyn päässä)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$\alpha_b$	0,750 -	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_1$	2,5 -	(reunapultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_2$	2,5 -	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$l_{km}$	1 kpl	muiden pulttien lukumäärä	
$l_{km2}$	1 kpl	Reunapulttien $l_{km}$	
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Reunapuristuskestävyyden osavarmuusluku, EN 1993-1-8, taulukko 2.1	

$F_{b,Rd}$	612,0 kN
$F_{b,Rd}$	2448,0 kN

(yksi levy)  
(neljä levyä)

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}}$$

Vetokestävyys	PL7
---------------	-----

EN1993-1-1, 6.2.3(4)

$b$	140 mm	Levyn leveys	
$t$	10 mm	Levyn paksuus	
$d_0$	33 mm	Pultin reiän halkaisija	
$A_{net}$	1070 mm <sup>2</sup>	Poikkileikkauksen nettopinta-ala	$A_{net} = b * t - d_0 * t$
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>	Levyn myötöraja	EN1993-1-1, taulukko 3.1
$\gamma_{M0}$	1,0 -	Poikkileikkauksen osavarmuus	EN 1993-1-1, 6.1 (1)

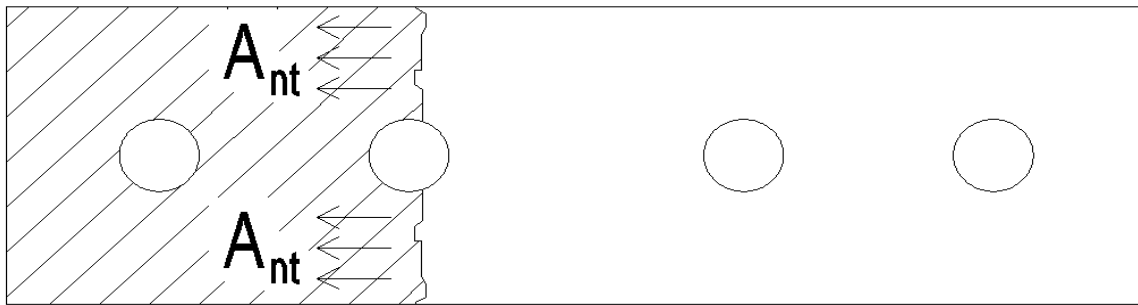
$N_{net,Rd}$	379,9 kN
$N_{net,Rd}$	1519,4 kN

(yksi levy)  
(neljä levyä)

$$N_{net,Rd} = \frac{A_{net} * f_y}{\gamma_{M0}}$$

EN1993-1-1, 6.2.3(4)

Levyn palamurtuminen	PL7
----------------------	-----



PL7

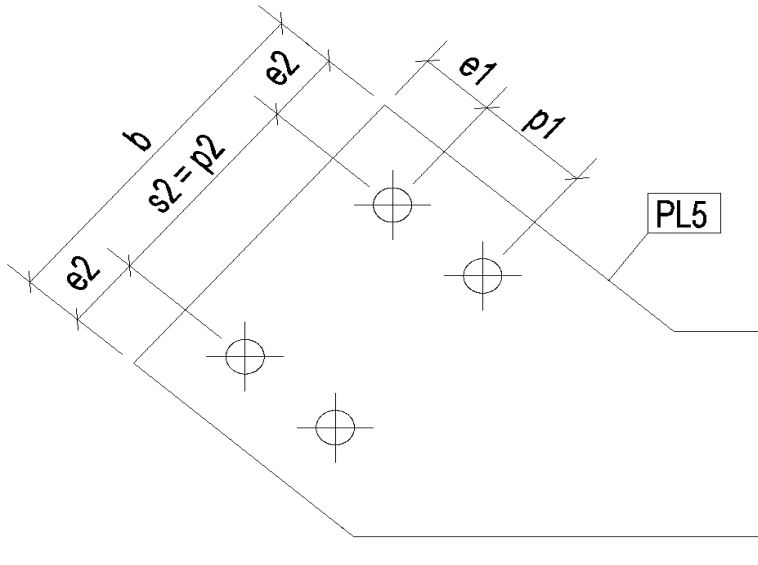
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>	Myötöraja
$d_0$	33 mm	Pultin reiän halkaisija
$t$	10 mm	Levyn paksuus
$b$	140 mm	Levyn leveys
$A_{nt}$	1070 mm <sup>2</sup>	Vedon rasittama nettopinta-ala $A_{nt} = (b - d_0) \cdot t$
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Osavarmuus vetomurtumiselle EN 1993-1-1, 6.1 (1)
$e_1$	66 mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa
$p_1$	99 mm <sup>2</sup>	Pulttien väli voiman suunnassa
$A_{nV}$	0 mm <sup>2</sup>	Leikkauksen rasittama nettopinta-ala
$\gamma_{M0}$	1,0 -	Poikkileikkauksen osavarmuus EN 1993-1-1, 6.1 (1)

$$V_{eff,1,Rd} = f_u A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) f_y A_{nV} / \gamma_{M0}$$

$V_{eff,1,Rd}$	436,6 kN	(yksi levy)
$V_{eff,1,Rd}$	1746,2 kN	(neljä levyä)

EN 1993-1-8, kaava 3.9

## Poskilevyt [ PL5 ]



n	2 kpl	Pultteja rivissä (voimaa kohtisuoraan vastaan)	
t	2 kpl	Pultteja jonossa (voiman suunnassa)	
b	2 -	Leikkeisyys	
t	15 mm	Levyn paksuus	
b	319 mm	Levyn leveys	
h	560 mm	Levyn pituus	
teräs	S355	Levyn materiaali	
f <sub>y</sub>	355 N/mm <sup>2</sup>	Levyn myötöraja	EN1993-1-1, taulukko 3.1
f <sub>u</sub>	510 N/mm <sup>2</sup>	Levyn vetomurtolujuus	EN1993-1-1, taulukko 3.1

## Reikien geometria [ PL5 ]

e <sub>1</sub>	66 mm
p <sub>1</sub>	99 mm
e <sub>2</sub>	66 mm
s <sub>2</sub>	187 mm

## Liukumiskestävyyden mitoitusarvo

PL5

EN1993-1-8, 3.9.1

f <sub>ub</sub>	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN1993-1-8, taulukko 3.1
d <sub>0</sub>	33 mm	Pultin reiän halkaisija	
A <sub>s</sub>	561 mm <sup>2</sup>	Yhden pultin poikkipinta-ala	
l <sub>km</sub>	4 kpl	Pulttien lukumäärä	
F <sub>p,C</sub>	1570,8 kN	$F_{p,C} = 0,7 * f_{ub} * A_s * kpl$	
k <sub>s</sub>	1		EN1993-1-8, taulukko 3.6
n	2	Kitkapintojen lukumäärä	
μ	0,4	Kitkakerroin	EN1993-1-8, taulukko 3.7
γ <sub>M3</sub>	1,25 -	Liukumiskestävyyden osavarmuus (kiinnitysluokka C)	EN1993-1-8, taulukko 2.1

F<sub>s,Rd</sub> 1005,3 kN

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s * n * \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C}$$

EN1993-1-8, 3.9.1

LIITE C: LIITOSVAIHTOEHTO 2 LUJUUSLASKELMAT

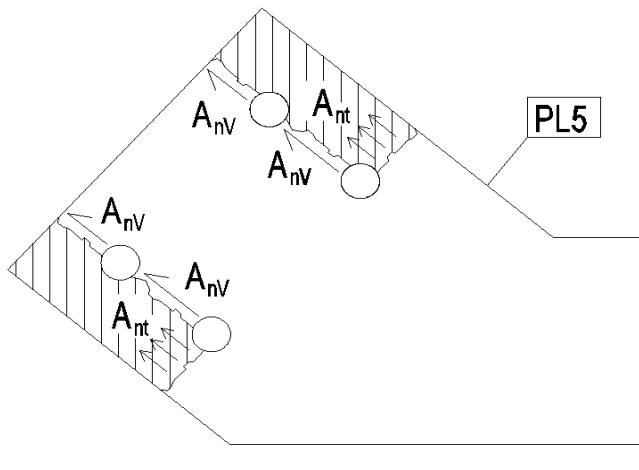
Reunapuristuskestävyys		PL5	EN1993-1-8, taulukko 3.4
$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$d$	30 mm	Pultin halkaisija	
$d_0$	33 mm	Pultin reiän halkaisija	
$t$	15 mm	Levyn paksuus	
$n$	2 -	Levyä per liitos	
$A_s$	561 mm <sup>2</sup>	Yhden pultin poikkipinta-ala	
$e_1$	66 mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa	
$e_2$	66 mm	Reunaetäisyys voimaa vastaan kohtisuoraan	
$p_1$	99 mm	Pulttien väli voiman suunnassa	
$s_2=p_2$	187 mm	Pulttien väli voimaa vastaan kohtisuoraan	
$\alpha_b$	0,667 -	(levyn päässä)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$\alpha_b$	0,750 -	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_1$	2,5 -	(reunapultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_2$	2,5 -	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$l_{km}$	2 kpl	muiden pulttien lukumäärä	
$l_{km2}$	1 kpl	Reunapulttien $l_{km}$	
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Reunapuristuskestävyyden osavarmuusluku, EN 1993-1-8, taulukko 2.1	

$F_{b,Rd}$	1836,0 kN	$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}}$	EN1993-1-8, taulukko 3.4
------------	-----------	---	--------------------------

Vetokestävyys		PL5	EN1993-1-1, 6.2.3(4)
$b$	319 mm	Levyn leveys	
$t$	15 mm	Levyn paksuus	
$d_0$	33 mm	Pultin reiän halkaisija	
$A_{net}$	4290 mm <sup>2</sup>	Poikkileikkauksen nettopinta-ala	$A_{net} = b * t - d_0 * t$
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>	Levyn myötöraja	EN1993-1-1, taulukko 3.1
$\gamma_{M0}$	1,0 -	Poikkileikkauksen osavarmuus, EN 1993-1-1, 6.1 (1)	

$N_{net,Rd}$	1523,0 kN	$N_{net,Rd} = \frac{A_{net} * f_y}{\gamma_{M0}}$	EN1993-1-1, 6.2.3(4)
--------------	-----------	--	----------------------

Levyn palamurtuminen	PL5
----------------------	-----



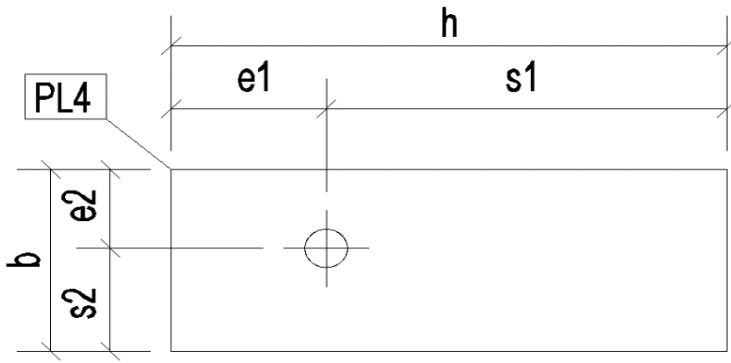
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>	Myötöraja	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$d_0$	33 mm	Pultin reiän halkaisija	
$t$	15 mm	Levyn paksuus	
$b$	319 mm	Levyn leveys	
$A_{nt}$	1485 mm <sup>2</sup>	Vedon rasittama nettopinta-ala	$A_{nt} = (2 * e_1 - d_0) * t$
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Osavarmuus vetomurtumiselle	EN 1993-1-1, 6.1 (1)
$e_1$	66 mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa	
$p_1$	99 mm <sup>2</sup>	Pulttien väli voiman suunnassa	
$A_{nv}$	1733 mm <sup>2</sup>	Leikkauksen rasittama nettopinta-ala	$A_{nv} = 2 * (e_1 + p_1 - 1,5d_0) * t$
$\gamma_{M0}$	1,0 -	Poikkileikkauksen osavarmuus	EN 1993-1-1, 6.1 (1)

$$V_{eff,1,Rd} = f_u A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) f_y A_{nv} / \gamma_{M0}$$

$V_{eff,1,Rd}$	961,0 kN	(yksi levy)
----------------	----------	-------------

EN 1993-1-8, kaava 3.9

Poskilevyt [ PL4 ]



		1 kpl	Pultteja rivissä (kuvassa pystysuunnassa)	
		1 kpl	Pultteja jonossa (kuvassa vaakasuunnassa)	
n		1 -	Leikkeisyys	
t		15 mm	Levyn paksuus	
b		160 mm	Levyn leveys	
h		420 mm	Levyn pituus	
teräs		S355	Levyn materiaali	
$f_y$		355 N/mm <sup>2</sup>	Levyn myötöraja	EN1993-1-1, taulukko 3.1
$f_u$		510 N/mm <sup>2</sup>	Levyn vetomurtolujuus	EN1993-1-1, taulukko 3.1

Reikien geometria [ PL4 ]

$e_1$	66 mm
$p_1$	0 mm
$e_2$	66 mm

Liukumiskestävyuden mitoitusarvo

PL4

EN1993-1-8, 3.9.1

$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN1993-1-8, taulukko 3.1
$d_0$	33 mm	Pultin reiän halkaisija	
$A_s$	561 mm <sup>2</sup>	Yhden pultin poikkipinta-ala	
l <sub>km</sub>	1 kpl	Pulttien lukumäärä	
$F_{p,C}$	392,7 kN	$F_{p,C} = 0,7 * f_{ub} * A_s * kpl$	
$k_s$	1		EN1993-1-8, taulukko 3.6
n	2	Kitkapintojen lukumäärä	
$\mu$	0,4	Kitkakerroin	EN1993-1-8, taulukko 3.7
$\gamma_{M3}$	1,25 -	Liukumiskestävyuden osavarmuus (kiinnitysluokka C)	EN1993-1-8, taulukko 2.1

$F_{s,Rd}$  251,3 kN

(yksi levy)

$F_{s,Rd}$  502,7 kN

(kaksi levyä)

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s * n * \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C}$$

EN1993-1-8, 3.9.1

# LIITE C: LIITOSVAIHTOEHTO 2 LUJUUSLASKELMAT

Reunapuristuskestävyys	PL7
------------------------	-----

EN1993-1-8, taulukko 3.4

$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$d$	30 mm	Pultin halkaisija	
$d_0$	33 mm	Pultin reiän halkaisija	
$t$	15 mm	Levyn paksuus	
$n$	2 -	Levyä per liitos	
$A_s$	561 mm <sup>2</sup>	Yhden pultin poikkipinta-ala	
$e_1$	66 mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa	
$e_2$	66 mm	Reunaetäisyys voimaa vastaan kohtisuoraan	
$P_1$	0 mm	Pulttien väli voiman suunnassa	
$P_2$	0 mm	Pulttien väli voimaa vastaan kohtisuoraan	
$\alpha_b$	0,667 -	(levyn päässä)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_1$	2,5 -	(reunapultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$l_{km}$	0 kpl	muiden pulttien lukumäärä	
$l_{km2}$	1 kpl	Reunapulttien $l_{km}$	
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Reunapuristuskestävyyden osavarmuusluku, EN 1993-1-8, taulukko 2.1	

$F_{b,Rd}$	612,0 kN
$F_{b,Rd}$	1224,0 kN

(yksi levy)

(kaksi levyä)

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}}$$

Vetokestävyys	PL7
---------------	-----

EN1993-1-1, 6.2.3(4)

$b$	160 mm	Levyn leveys	
$t$	15 mm	Levyn paksuus	
$d_0$	33 mm	Pultin reiän halkaisija	
$A_{net}$	1905 mm <sup>2</sup>	Poikkileikkauksen nettopinta-ala	$A_{net} = b * t - d_0 * t$
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>	Levyn myötöraja	EN1993-1-1, taulukko 3.1
$\gamma_{M0}$	1,0 -	Poikkileikkauksen osavarmuus	EN 1993-1-1, 6.1 (1)

$N_{net,Rd}$	676,3 kN
$N_{net,Rd}$	1352,6 kN

(yksi levy)

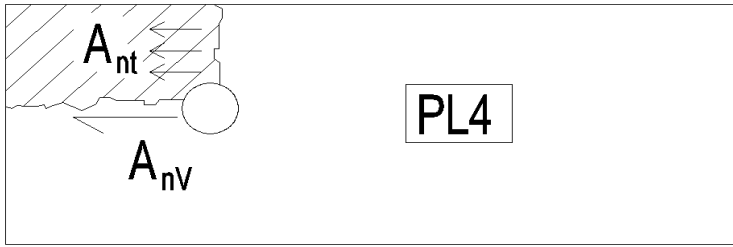
(kaksi levyä)

$$N_{net,Rd} = \frac{A_{net} * f_y}{\gamma_{M0}}$$

EN1993-1-1, 6.2.3(4)



Levyn palamurtuminen	PL7
----------------------	-----

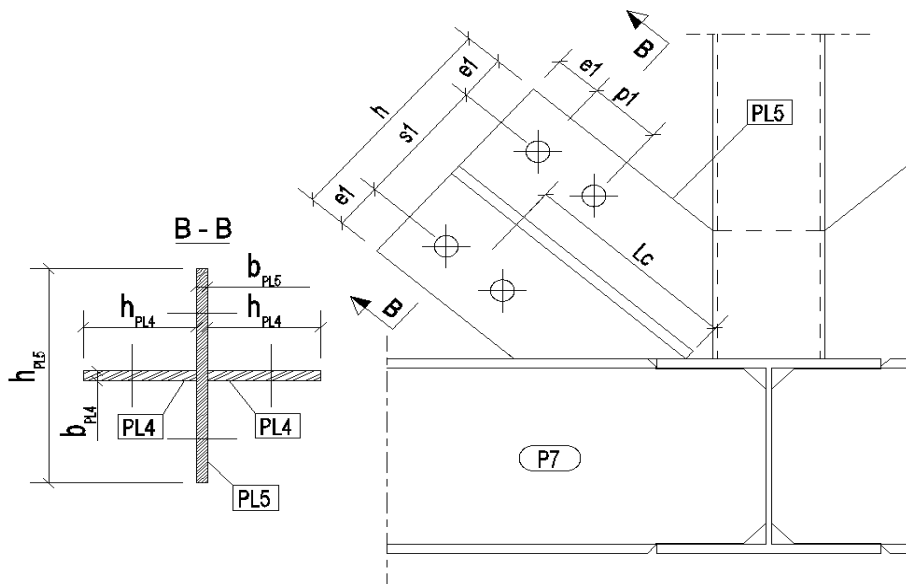


$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>	Myötöraja	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$d_0$	33 mm	Pultin reiän halkaisija	
$t$	15 mm	Levyn paksuus	
$b$	160 mm	Levyn leveys	
$A_{nt}$	2153 mm <sup>2</sup>	Vedon rasittama nettopinta-ala	$A_{nt} = (b - 0,5d_0) * t$
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Osavarmuus vetomurtumiselle	EN 1993-1-1, 6.1 (1)
$e_1$	66 mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa	
$p_1$	0 mm <sup>2</sup>	Pulttien väli voiman suunnassa	
$A_{nv}$	742,5 mm <sup>2</sup>	Leikkauksen rasittama nettopinta-ala	$A_{nv} = (e_1 - 0,5d_0) * t$
$\gamma_{M0}$	1,0 -	Poikkileikkauksen osavarmuus	EN 1993-1-1, 6.1 (1)

$$V_{eff,1,Rd} = f_u A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) f_y A_{nv} / \gamma_{M0}$$

$V_{eff,1,Rd}$	1030,4 kN	(yksi levy)	EN 1993-1-8, kaava 3.9
$V_{eff,1,Rd}$	4121,6 kN	(neljä levyä)	

# PL4+PL5:n Nurjahduskestävyys



$b_{PL5}$	15 mm	PL5 paksuus [= $t_{PL5}$ ]
$h_{PL5}$	319 mm	PL5 korkeus [= $b_{PL5}$ ]
$h_{PL4}$	160 mm	PL4 korkeus [= $b_{PL4}$ ]
$b_{PL4}$	15 mm	PL4 paksuus [= $t_{PL4}$ ]
$I_y$	4066,7 cm <sup>4</sup>	$I_y = b_{PL5} * h_{PL5}^3 / 12 + 2 * h_{PL4} * b_{PL4}^3 / 12$
$I_z$	4703,9 cm <sup>4</sup>	

$$I_z = \frac{\left(\frac{h_{PL5}}{2} - \frac{h_{PL4}}{2}\right) * b_{PL5}^3}{12} * 2 + \frac{b_{PL4} * (h_{PL4} * 2 + b_{PL5})^3}{12}$$

$I$	4067 cm <sup>4</sup>	$I = \text{MIN}(I_y ; I_z)$
$A$	9585 mm <sup>2</sup>	$A = h_{PL5} * b_{PL5} + h_{PL4} * b_{PL4} * 2$
$i$	65,14 mm	$i = (I/A)^{0,5}$
$L_c$	500 mm	(masto $L_c = L * 2$ )
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>	Teräslaji oletetaan samaksi molemmissa levyissä
$E$	210000 N/mm <sup>2</sup>	Kimmokerroin
$\bar{\lambda}$	0,10046 -	Suhteellinen hoikkuus $\bar{\lambda} = \frac{L_c}{\pi * i} * \sqrt{\frac{f_y}{E}}$
$\alpha$	0,49	Epätarkkuustekijä
$\phi$	50,04191887 -	$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2)$
$\chi$	355 N/mm <sup>2</sup>	$\chi = 1 / \left( \phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2} \right)$
$\gamma_{M0}$	1,0 -	Poikkileikkauksen osavarmuus EN 1993-1-1, 6.1 (1)

$$N_{pl,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$\text{Käyttaste [ KA ]} = N_{PL1.d} / N_{pl.Rd}$$

$N_{pl,Rd}$  3402,7 kN

KA 0,44 -

LIITE C: LIITOSVAIHTOEHTO 2 LUJUUSLASKELMAT

Hitsien mitoitus

Piste	Mitoituskohta	$L_w$	$a$	$f_u$	$\beta_w$	$\gamma_{M2}$	$F_{w,Rd}$
-	-	[ mm ]	[ mm ]	[ N/mm <sup>2</sup> ]	-	-	[ kN ]
17	PL4 - P6	320	7	510	0,9	1,25	1015
18	PL4 - PL5	840	7	510	0,9	1,25	2666
19	PL5 - (P7+P6)	500	7	510	0,9	1,25	1587
20	PL9 - P4	1000	6	510	0,9	1,25	2720
21	PL6 - P4	340	6	510	0,9	1,25	925

Hitsien summa kestävyys

$F_{w1,Rd}$	4570 kN	Kiinnitys diagonaaliin [ piste(20) + 2* piste(21) ]
$F_{w2,Rd}$	4189 kN	Kiinnitys alapaarteeseen [ 2 * piste(19) + piste(17) ]
$F_{w3,Rd}$	3681 kN	Liitoslevyn PL4 kiinnitys [ piste(17) + piste(18) ]

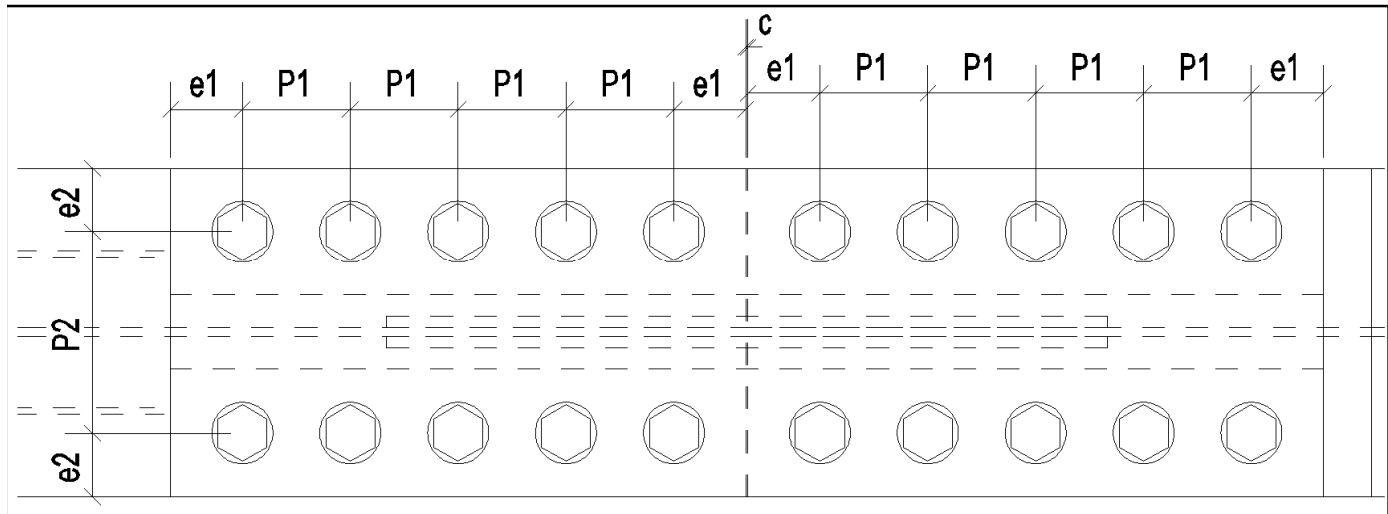
DIAGONAALIN LASKENNAN TULOKSET

DIAGONAALIN KESTÄVYYKSIEN YHTEENVETO

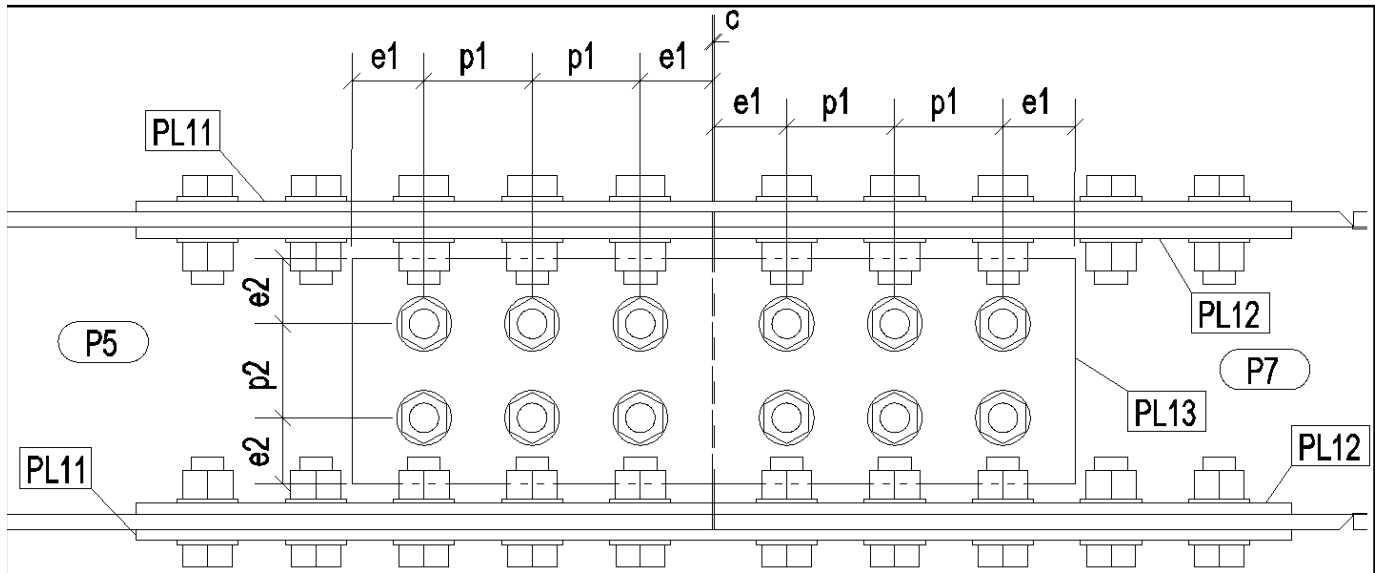
	Mitoituskohta	Rasitus	Kestävyys	yksikkö	käyttöaste	
PL4+PL5	Liukumiskestävyys	1500	1508	kN	0,99	OK
PL7+PL8	Liukumiskestävyys	1500	1508	kN	0,99	OK
PL6+PL9	Liukumiskestävyys	1500	1508	kN	0,99	OK
PL4+PL5	Reunapuristuskestävyys	1500	3060	kN	0,49	OK
PL7+PL8	Reunapuristuskestävyys	1500	3746	kN	0,40	OK
PL6+PL9	Reunapuristuskestävyys	1500	1522	kN	0,99	OK
PL4+PL5	Vetokestävyys	1500	2876	kN	0,52	OK
PL7+PL8	Vetokestävyys	1500	3039	kN	0,49	OK
PL6+PL9	Vetokestävyys	1500	2615	kN	0,57	OK
PL4+PL5	Palamurtuminen	1500	3022	kN	0,50	OK
PL7+PL8	Palamurtuminen	1500	1746	kN	0,86	OK
PL6+PL9	Palamurtuminen	1500	2226	kN	0,67	OK
PL4+PL5	Levyn nurjahdus	1500	3403	kN	0,44	OK
PL6+PL9	Hitsit 20 ja 21	1500	4570	kN	0,33	OK
PL4+PL5	Hitsit 19 ja 17	1500	4189	kN	0,36	OK
PL4	Hitsit 17 ja 18	375	3681	kN	0,10	OK
Suurin käyttöaste					0,99	

## ALAPAARTEEN MITOITUS

## PULTTIEN REUNAETÄISYYDET



Levy	tunnus	e1	p1	e2	p2	p2 min
Laippalevyt	PL11	66	99	59	182	#REF!
		OK	OK	OK	OK	#REF!
Laippalevyt	PL12	66	99	59	0	0
		OK	OK	OK	OK	OK

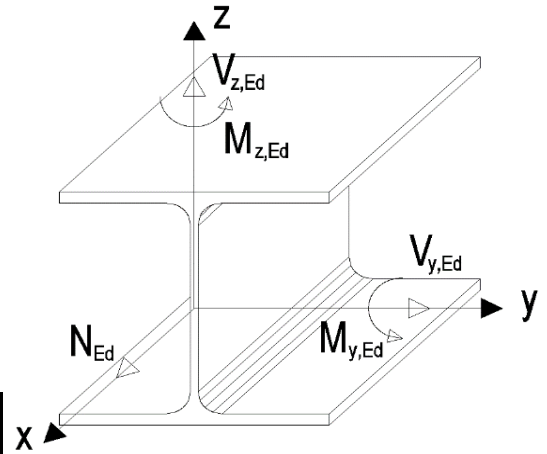


Levy	tunnus	e1	p1	e2	p2
Uumalevyt	PL13	54	78	64	78
		OK	OK	OK	OK

# LIITE C: LIITOSVAIHTOEHTO 2 LUJUUSLASKELMAT

## KUORMITUS

$N_{Ed}$	1800	kN	Normaalivoima (+ = puristus)
$V_{z,Ed}$	150	kN	Leikkausvoima uuman suuntaan
$V_{y,Ed}$	240	kN	Leikkausvoima laipan suuntaan
$M_{y,Ed}$	60	kNm	Momentti vahvaan suuntaan
$M_{z,Ed}$	60	kNm	Momentti heikkoon suuntaan



## ALAPAARTEEN LIITOSLEVYJEN KESTÄVYYDET

Levy	tunnus	Puristus	Leikkaus	Leikkaus	Momentti	
		$N_{c,Rd}$ kN	$V_{y,Rd}$ kN	$V_{z,Rd}$ kN	$M_{y,Rd}$ kNm	$M_{z,Rd}$ kNm
Laippalevyt	PL1	1065	615	0	514	213
Laippalevyt	PL2	419	242	0		
Uumalevyt	PL3	731	0	422		
$\Sigma$		2215	857	422	OK	OK
		OK	OK	OK	OK	OK

## ALAPAARTEEN LIITOSLEVYJEN JÄNNITYKSET

### Normaalivoima

[kaikki pisteet]

$N_{Ed}$	$\Sigma A$	$\sigma_N$
kN	mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1800	14840	121,3

$$\sigma_N = \frac{N_{Ed}}{A}$$

### Leikkausvoima (z)

[piste 4]

$V_{z,Ed}$	$\Sigma A_{Vz}$	$\sigma_{Vz}$
kN	mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
150	4120	63,1

$$\sigma_{Vz} = \frac{V_{z,max}}{A_{Vz}} = \frac{\sqrt{3} * V_{z,Ed}}{2 * b_{PL3} * t_{PL3}}$$

### Leikkausvoima (y)

[pisteet 2, 6]

$V_{y,Ed}$	$\Sigma A_{Vy}$	$\sigma_{Vy}$
kN	mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
240	6000	40,0

$$\sigma_{Vy} = \frac{V_{y,max}}{A_{Vy}} = \frac{\sqrt{3} * V_{y,Ed}}{2 * b_{PL1} * t_{PL1}}$$

### Momentti (y)

(+) [pisteet 5,6,7]

(-) [pisteet 1,2,3]

$M_{y,Ed}$	$W_y$	$+\sigma_{My}$	$-\sigma_{My}$
kNm	cm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
60	1449	41,4	-41,4

$$\sigma_{My} = \frac{M_{y,Ed}}{W_y}$$

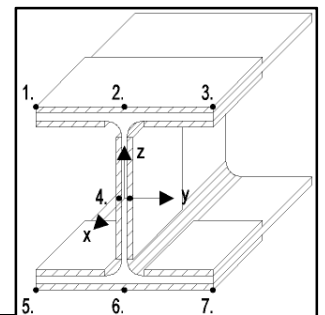
### Momentti (z)

(+) [pisteet 3,7]

(-) [pisteet 1,5]

$M_{z,Ed}$	$W_z$	$+\sigma_{Mz}$	$-\sigma_{Mz}$
kNm	cm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
60	600	100,0	-100,0

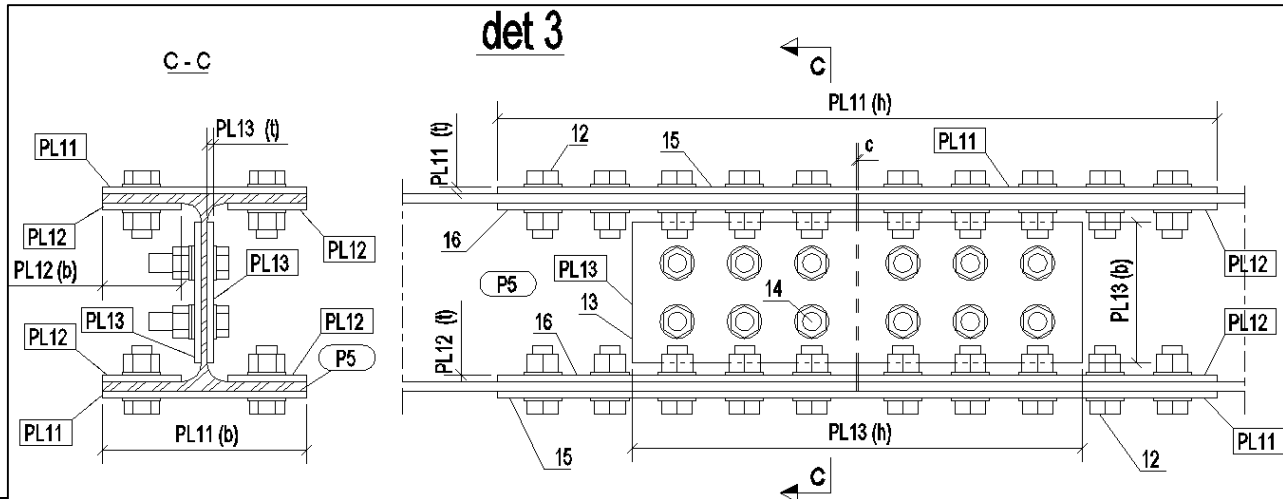
$$\sigma_{Mz} = \frac{M_{z,Ed}}{W_z}$$



status	Tarkastelupiste	$\sigma_N$	$\sigma_{Vz}$	$\sigma_{Vy}$	$\sigma_{My}$	$\sigma_{Mz}$	$\Sigma \sigma$	$\pm \sigma_{vertailu}$	käyttöaste
		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
OK	1	121,3	0	0	-41,4	-100,0	-20,2	355	0,06
OK	2	121,3	0	40,0	-41,4	0	119,9	355	0,34
OK	3	121,3	0	0	-41,4	100,0	179,9	355	0,51
OK	4	121,3	63,1	0	0	0	184,4	355	0,52
OK	5	121,3	0	0	41,4	-100,0	62,7	355	0,18
OK	6	121,3	0	40,0	41,4	0	202,7	355	0,57
OK	7	121,3	0	0	41,4	100,0	262,7	355	0,74

## ALAPAARTEEN HITSIT

Kohta	Hitsi tyyppi	a-mitta	Tarkennus
10	Piena mp	5	molemmin puolin, railoitettuna 0,5 ... 1 mm
9	Puoli V tasalle	14	Tasaluja hitsi on hiottu tasalle
11	Piena mp	5	molemmin puolin, railoitettuna 0,5 ... 1 mm



## (10) Hitsien kestävyys

$L_w$	396 mm	Hitsin pituus ( $L_w = (d_{p7} - 10\text{mm}) * 2$ )	
$a$	5 mm	Pienahitsi molemmin puolin ( $a = t_{w,p7} / 2$ , pyör. ylös)	
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Heikoimman osan vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$\beta_w$	0,9 -	Korrelaatiokerroin	EN 1993-1-8, taulukko 4.1
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Hitsien osavarmuus	EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$$F_{w,Rd} = 518,2 \text{ kN}$$

$$F_{w,Rd} = \frac{L_w * a * f_u}{\beta_w * \gamma_{M2} * \sqrt{3}}$$

EN 1993-1-8, kaavat 4.3 ja 4.4

## (9) Hitsien kestävyys

$L_w$	600 mm	Hitsin pituus ( $L_w = 2 * b_{p7}$ )	
$a$	14 mm	Tasaluja puoli V hitsi hiottu tasalle. ( $a = t_{f,p7}$ )	
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Heikoimman osan vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$\beta_w$	0,9 -	Korrelaatiokerroin	EN 1993-1-8, taulukko 4.1
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Hitsien osavarmuus	EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$$F_{w,Rd} = 2198,5 \text{ kN}$$

$$F_{w,Rd} = \frac{L_w * a * f_u}{\beta_w * \gamma_{M2} * \sqrt{3}}$$

EN 1993-1-8, kaavat 4.3 ja 4.4

## (11) Hitsien kestävyys

$L_w$	467 mm	Hitsin pituus (kaksi laippa, molemmin puolin) $L_w = 2 * 2 * (b_{p6} / 2 - t_{w,p6} / 2 - r_{p6} - 2)$	
$a$	5 mm	Pienahitsi molemmin puolin	
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Heikoimman osan vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$\beta_w$	0,9 -	Korrelaatiokerroin	EN 1993-1-8, taulukko 4.1
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Hitsien osavarmuus	EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$$F_{w,Rd} = 611,1 \text{ kN}$$

$$F_{w,Rd} = \frac{L_w * a * f_u}{\beta_w * \gamma_{M2} * \sqrt{3}}$$

EN 1993-1-8, kaavat 4.3 ja 4.4

## ALAPAAARTEEN PULTTIEN KESTÄVYYS

## PL11:n liukumiskestävyys

$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$d$	30 mm	Pultin halkaisija	
$A_s$	561 mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$F_{p,C}$	393 kN	Esijännitysvoima	EN 1993-1-8, kaavat 3.7 $F_{p,C} = 0,7 * f_{ub} * A_s$
$k_s$	1 -	Normaalit pyöreät reiät	EN 1993-1-8, Taulukko 3.6
$n$	2 -	Kitkapintojen lukumäärä (kaksi laippaa)	
$\mu$	0,4 -	Kitkakerroin (luokka B)	EN 1993-1-8, Taulukko 3.7
$l_{km}$	10 kpl	Pulttien lukumäärä	
$\gamma_{M3}$	1,25 -	Liukumiskestävyys (luokka C)	EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$$F_{s,Rd} = 2513,3 \text{ kN}$$

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s * n * \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C} \quad \text{EN 1993-1-8, kaavat 3.6}$$

## PL11:n reunapuristuskestävyys

$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$d$	30 mm	(pultin halkaisija)	
$d_0$	33 mm	(reiän halkaisija)	
$t$	10 mm	Liitoslevyn paksuus	
$n$	1 -	leikkeisyys Levyt PL12 lasketaan erillisenä)	
$n_i$	2 -	laippojen lukumäärä	
$A_s$	561 mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$e_1$	66 mm	Reunaetäisyys voimansuunnassa	
$e_2$	59 mm	Reunaetäisyys voimaa vastaan kohtisuoraan	
$P_1$	99 mm	Pulttien väli voiman suunnassa	
$P_2$	182 mm	Pulttien väli voimaa vastaan kohtisuoraan	
$\alpha_b$	0,667 -	(levyn päässä)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$\alpha_b$	0,75 -	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_1$	2,5 -	(reunapultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_2$	2,5 -	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$l_{km}$	8 kpl	muiden pulttien lukumäärä	
$l_{km2}$	2 kpl	Reunapulttien $l_{km}$	
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Kestävyysosavarmuusluku	EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$$F_{b,Rd} = 4080,0 \text{ kN}$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} \quad \text{EN 1993-1-8, taulukko 3.4}$$

## P7:n Laipan palamurtuminen (tapaus 1)

$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>	Teräksen myötöraja	
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	
$d_0$	33 mm	Uuma pultin reiän halkaisija	
$t_f$	14 mm	Profiilin laipan paksuus	
$e_2$	59 mm	Pulttien väli voimaa vastaan kohtisuoraan	
$A_{nt}$	1456 mm <sup>2</sup>	Vedon rasittama nettopinta-ala	$A_{nt} = 2 * 2 * [(e_2 - d_0) * t_w]$
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Osavarmuus vetomurtumiselle	EN 1993-1-1, 6.1 (1)
$e_1$	66 mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa	
$p_1$	99 mm <sup>2</sup>	Pulttien väli voiman suunnassa	
$A_{nv}$	6468 mm <sup>2</sup>	Leikkauksen rasittama nettopinta-ala	$A_{nv} = 2 * 2 * (e_1 + 4 * p_1 - 4,5 * d_0) * t_f$
$\gamma_{M0}$	1,0 -	Poikkileikkauksen osavarmuus	EN 1993-1-1, 6.1 (1)

$$V_{eff,1,Rd} = f_u A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) f_y A_{nv} / \gamma_{M0}$$

$$V_{eff,1,Rd} = 1919,7 \text{ kN} \quad (\text{sis. Molemmat laipat})$$

EN 1993-1-8, kaava 3.9

## P7:n Laipan palamurtuminen (tapaus 2)

$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>	Teräksen myötöraja	
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	
$r$	27 mm	Profiilin pyöristys	
$t_f$	14 mm	Profiilin laipan paksuus	
$e_2$	59 mm	Pulttien väli voimaa vastaan kohtisuoraan	
$d_0$	33 mm	Uuma pultin reiän halkaisija	
$t_w$	8,5 mm	Uuman paksuus	
$b$	300 mm	Laipan leveys	
$A_{nt}$	8859 mm <sup>2</sup>	Vedon rasittama nettopinta-ala	$A_{nt} = 2 * (b * t_f + r * t_w)$
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Osavarmuus vetomurtumiselle	EN 1993-1-1, 6.1 (1)
$e_1$	66 mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa	
$p_1$	99 mm <sup>2</sup>	Pulttien väli voiman suunnassa	
$A_{nv}$	1963,5 mm <sup>2</sup>	Leikkauksen rasittama nettopinta-ala	$A_{nv} = 2 * [(e_1 + p_1 + p_1 - 2,5 * d_0) * t_w]$
$\gamma_{M0}$	1,0 -	Poikkileikkauksen osavarmuus	EN 1993-1-1, 6.1 (1)

$$V_{eff,1,Rd} = f_u A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) f_y A_{nv} / \gamma_{M0}$$

$$V_{eff,1,Rd} = 4016,9 \text{ kN} \quad (\text{sis. Molemmat laipat})$$

EN 1993-1-8, kaava 3.9



LIITE C: LIITOSVAIHTOEHTO 2 LUJUUSLASKELMAT

PL12:n liukumiskestävyys

$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$d$	30 mm	Pultin halkaisija	
$A_s$	561 mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$F_{p,C}$	393 kN	Esijännitysvoima	EN 1993-1-8, kaavat 3.7
$F_{p,C} = 0,7 * f_{ub} * A_s$			
$k_s$	1 -	Normaalit pyöreät reiät	EN 1993-1-8, Taulukko 3.6
$n$	2 -	Kitkapintojen lukumäärä (kaksi laippaa)	
$\mu$	0,4 -	Kitkakerroin	EN 1993-1-8, Taulukko 3.7
$l_{km}$	10 kpl	Pulttien lukumäärä	
$\gamma_{M3}$	1,25 -	Liukumiskestävyys (luokka C)	EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$F_{s,Rd}$	2513,3 kN
------------	-----------

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s * n * \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C}$$

EN 1993-1-8, kaavat 3.6

PL12:n reunapuristuskestävyys

$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$d$	30 mm	Laippa pultin halkaisija	
$d_0$	33 mm	Laippa pultin reiän halkaisija	
$t$	10 mm	Liitoslevyn paksuus	
$n$	2 -	liitoslevyä/laippa	
$n_l$	2 -	laippojen lukumäärä	
$A_s$	561 mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$e_1$	66 mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa	
$e_2$	59 mm	Reunaetäisyys voimaa vastaan kohtisuoraan	
$P_1$	99 mm	Pulttien väli voiman suunnassa	
$P_2$	0 mm	Pulttien väli voimaa vastaan kohtisuoraan	
$\alpha_b$	0,667 -	(levyn päässä)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$\alpha_b$	0,75 -	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_1$	2,5 -	(reunapultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_2$	2,5 -	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$l_{km}$	4 kpl	muiden pulttien lukumäärä	
$l_{km2}$	1 kpl	Reunapulttien $l_{km}$	
$\gamma_{M3}$	1,25 -	Liukumiskestävyys (luokka C)	EN 1993-1-8, taulukko 2.1

$F_{s,Rd}$	4080,0 kN
------------	-----------

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}}$$

EN 1993-1-8, taulukko 3.4

# LIITE C: LIITOSVAIHTOEHTO 2 LUJUUSLASKELMAT

## PL13:n liukumiskestävyys

$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$d$	24 mm	Pultin halkaisija	
$A_s$	353 mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$F_{p,C}$	247 kN	Esijännitysvoima	EN 1993-1-8, kaavat 3.7
$F_{p,C} = 0,7 * f_{ub} * A_s$			
$k_s$	1 -	Normaalit pyöreät reiät	EN 1993-1-8, Taulukko 3.6
$n$	2 -	Kitkapintojen lukumäärä (kaksi levyä uumassa)	
$\mu$	0,4 -	Kitkakerroin	EN 1993-1-8, Taulukko 3.7
$l_{km}$	6 kpl	Pulttien lukumäärä	
$\gamma_{M3}$	1,25 -	Liukumiskestävyys (luokka C)	EN 1993-1-8, taulukko 2.1
$F_{s,Rd} = \frac{k_s * n * \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C}$			
$F_{s,Rd}$	948,9 kN		EN 1993-1-8, kaavat 3.6

## PL13:n reunapuristuskestävyys

$f_{ub}$	1000 N/mm <sup>2</sup>	Pultin vetomurtolujuus	EN 1993-1-8, taulukko 3.1
$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus	EN 1993-1-1, taulukko 3.1
$d$	24 mm	Laippa pultin halkaisija	
$d_0$	26 mm	Laippa pultin reiän halkaisija	
$t$	10 mm	Liitoslevyn paksuus	
$n$	2 -	liitoslevyä/uuma	
$n_l$	1 -	Uumien lukumäärä	
$A_s$	353 mm <sup>2</sup>	Pultin poikkipinta-ala (kierteinen osa)	
$e_1$	54 mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa	
$e_2$	64 mm	Reunaetäisyys voimaa vastaan kohtisuoraan	
$P_1$	78 mm	Pulttien väli voiman suunnassa	
$P_2$	78 mm	Pulttien väli voimaa vastaan kohtisuoraan	
$\alpha_b$	0,692 -	(levyn päässä)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$\alpha_b$	0,75 -	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_1$	2,5 -	(reunapultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$k_2$	2,5 -	(muut pultit)	EN 1993-1-8, taulukko 3.4
$l_{km}$	6 kpl	muiden pulttien lukumäärä	
$l_{km2}$	2 kpl	Reunapulttien lkm	
$\gamma_{M3}$	1,25 -	Liukumiskestävyys (luokka C)	EN 1993-1-8, taulukko 2.1
$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}}$			
$F_{s,Rd}$	2711,6 kN		EN 1993-1-8, taulukko 3.4

## NURJAHDUS PULTTIEN VÄLISSÄ

Rakenteen kaarevuus on mallinnettu laskentaan seuraavasti:

Vedossa rakenne suoristuu eikä tällä katsota olevan heikentävää vaikutusta.

Puristuksessa profiileita liittävät levyt PL1, PL2 ovat kaarevia. Kaarevuus huomioidaan asettamalla nurjahduskäyräksi epävarmin (d) ja siitä seurannut epätarkkuustekijä  $\alpha = 0,76$  [EN 1993-1-1, taulukko 6.1], sekä normaalisti pulttien väliseksi nurjahduspituudeksi ( $L_c$ ) asetettu  $0,8 * L$ , kasvatetaan arvoon  $L$  ( $L=L_c$ )

Nurjahduskäyrä	$a_0$	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä $\alpha$	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

[EN 1993-1-1, taulukko 6.1: Nurjahduskäyrien epätarkkuustekijät]

## PL11:n Nurjahdus pulttien välissä

$A_{\Sigma PL}$	14840 mm <sup>2</sup>	Liitoslevyjen poikkipinta-alojen summa
$A_{PL11}$	3000 mm <sup>2</sup>	Yksittäisen PL1:sen poikkipinta-ala
$n_A$	0,202 -	PL11:sen pinta-alan suhde kaikkien levyjen pinta-alaan ( $n_A = A_{PL11}/A_{\Sigma PL}$ )
$N_{Ed}$	1800 kN	Kaikille liitoslevyille tuleva yhteinen puristus
$N_{PL11,d}$	363,9 kN	Pinta-alojen suhteessa PL11:selle tuleva puristus ( $N_{PL11,d} = N_{Ed} * n_A$ )
c	2 mm	Profiilien välinen rako
$e_1$	54 mm	Liitoslevyn pulttien reunaetäisyys
$L_c$	110 mm	Liitoslevyn nurjahduspituus ( $L_c = e_1 + c + e_1$ )
h	10 mm	Levyn paksuus ( $h = t$ )
b	300 mm	Levyn leveys
I	2,5 cm <sup>4</sup>	Neliömomentti heikkoon suuntaan
i	2,887 mm	Hitaussäde $i = (I/A)^{0,5}$
$f_y$	335 N/mm <sup>2</sup>	Myötöraja EN 1993-1-1, taulukko 3.1
E	210000 N/mm <sup>2</sup>	Kimmokerroin
$\bar{\lambda}$	0,48 -	Suhteellinen hoikkuus $\bar{\lambda} = \frac{L_c}{(i + \pi)} * \sqrt{\frac{f_y}{E}}$
$\alpha$	0,76 -	Epätarkkuustekijä
$\phi$	0,73	$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2)$
$\chi$	0,79	$\chi = 1 / \left( \phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2} \right)$
$\gamma_{M0}$	1,0 -	Poikkileikkauksen osavarmuus EN 1993-1-1, 6.1 (1)
$N_{pl,Rd}$	794,21 kN	$N_{pl,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M0}}$
KA	0,46 -	Käyttöaste [ KA ] = $N_{PL11,d} / N_{pl,Rd}$

PL2:ssa on sama käyttöaste (samat reunaetäisyydet, sama lujuusluokka, rasitus on pinta-alan suhteella).

## PL13:n Nurjahdus pulttien välissä

$A_{\Sigma PL}$	14840 mm <sup>2</sup>	Liitoslevyjen poikkipinta-alojen summa
$A_{PL13}$	2060 mm <sup>2</sup>	Yksittäisen PL13:sen poikkipinta-ala
$n_A$	0,139 -	PL13:sen pinta-alan suhde kaikkien levyjen pinta-alaan ( $n_A = A_{PL13}/A_{\Sigma PL}$ )
$N_{Ed}$	1800 kN	Kaikille liitoslevyille tuleva yhteinen puristus
$N_{PL11,d}$	249,9 kN	Pinta-alojen suhteessa PL11:selle tuleva puristus ( $N_{PL11,d} = N_{Ed} * n_A$ )
$c$	2 mm	Profiilien välinen rako
$e_1$	54 mm	Liitoslevyn pulttien reunaetäisyys
$L_c$	110 mm	Liitoslevyn nurjahduspituus ( $L_c = e_1 + c + e_1$ )
$h$	10 mm	Levyn paksuus ( $h = t$ )
$b$	206 mm	Levyn leveys
$I$	1,7 cm <sup>4</sup>	Neliömomentti heikkoon suuntaan
$i$	2,887 mm	Hitaussäde $i = (I/A)^{0,5}$
$f_y$	335 N/mm <sup>2</sup>	Myötöraja
$E$	210000 N/mm <sup>2</sup>	Kimmokerroin
$\bar{\lambda}$	0,48 -	Suhteellinen hoikkuus $\bar{\lambda} = \frac{L_c}{(i + \pi)} * \sqrt{\frac{f_y}{E}}$
$\alpha$	0,76 -	Epätarkkuustekijä
$\phi$	0,73	$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2)$
$\chi$	0,79	$\chi = 1 / \left( \phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2} \right)$
$\gamma_{M0}$	1,0 -	Poikkileikkauksen osavarmuus

EN 1993-1-1, taulukko 3.1

 $N_{pl,Rd}$  545,36 kN

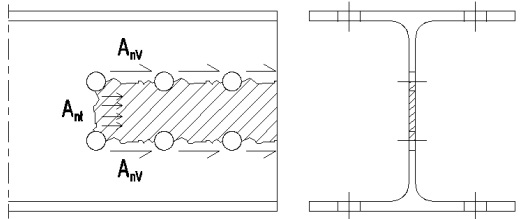
$$N_{pl,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M0}}$$

KA 0,46 -

 Käyttöaste [ KA ] =  $N_{PL11,d} / N_{pl,Rd}$ 

## P2:n Uuman palamurtuminen

$f_u$	510 N/mm <sup>2</sup>	Vetomurtolujuus
$f_y$	355 N/mm <sup>2</sup>	Myötöraja
$d_0$	26 mm	Uuma pultin reiän halkaisija
$t_w$	8,5 mm	Profiilin uuman paksuus
$p_2$	64 mm	Pulttien väli voimaa vastaan kohtisuoraan
$A_{nt}$	323 mm <sup>2</sup>	Vedon rasittama nettopinta-ala $A_{nt} = (p_2 - d_0) * t_w$
$\gamma_{M2}$	1,25 -	Osavarmuus vetomurtumiselle
$e_1$	54 mm	Reunaetäisyys voiman suunnassa
$p_1$	78 mm <sup>2</sup>	Pulttien väli voiman suunnassa
$A_{nV}$	2465 mm <sup>2</sup>	Leikkauksen rasittama nettopinta-ala $A_{nV} = 2 * (e_1 + p_1 + p_1 - 2,5 * d_0) * t_w$
$\gamma_{M0}$	1,0 -	Poikkileikkauksen osavarmuus



$$V_{eff,1,Rd} = f_u A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) f_y A_{nV} / \gamma_{M0}$$

 $V_{eff,1,Rd}$  637,0 kN

EN 1993-1-8, kaava 3.9

## ALAPAAARTEEN LASKENNAN TULOKSET

## ALAPAAARTEEN KESTÄVYYKSIEN YHTEENVETO

Mitoituskohta	Rasitus	Kestävyys	yksikkö	käyttöaste		
Levyjen normaalivoima	1800	2215	kN	0,81	OK	
Leikkaus (uuman suunta)	150	422	kN	0,36	OK	
Leikkaus (laippojen suunta)	240	857	kN	0,28	OK	
Taivutus (y-suunta)	60	514	kNm	0,12	OK	
Taivutus (z-suunta)	60	213	kNm	0,28	OK	
Levyjen summajännitykset	262,7	355	N/mm <sup>2</sup>	0,74	OK	
Hitsit (1+2+3) veto	1800	3328	kN	0,54	OK	
Pulttien Veto/puristus	1800	5975,4	kN	0,30	OK	Liukumiskestävyys
Levyjen veto/puristus	1800	10871,6	kN	0,17	OK	Reunapuristus
Profiilin veto/puristus	1800	2556,7	kN	0,70	OK	Palamurtuma
Laippalevyjen nurjahdus	364	794,2	kN	0,46	OK	Pulttien välinen nurjahdus
Uumalevyjen nurjahdus	250	545,4	kN	0,46	OK	Pulttien välinen nurjahdus
Suurin käyttöaste				0,81		

Pitkän pulttirivin leikkauskestävyyden pienennystä ei tarvitse huomioida murtorajassa liukumisen kestävässä liitoksessa (Kiinnitysluokassa C ja E ei tarkisteta kiinnikkeen leikkauskestävyyttä).

## PL2

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	1	2	3	4	5	
$t_1$ [mm]	10	10	10	10	10	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	1	1	1	1	1	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	$(n_r - 1) \cdot 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	
$T_{PD}$	0,27 min					

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	6	7	8	9	10	
$t_1$ [mm]	10	10	10	10	10	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	1	1	1	1	1	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	$(n_r - 1) \cdot 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	
$T_{PD}$	0,27 min					

Tuottava aika [ $T_{ND}$ ]

$r_i$	10	kpl	Porattavia rivejä
$\Sigma n_{il}$	0,00		$\Sigma(n_r - 1) \cdot 0,1$
$L$	1060	mm	Kappaleen pituus
$v$	0,05	min	Kappaleen siirtymäaika kuljettimella
$T_{ND}$	8,30	min	

## Materiaalikulut [poranterät]

$P_{DB}$	167,00	€	Poranterän hinta
$C_{cD}$	0,20	€/min	Kustannukset poranterästä

## Porauksen kustannukset (PL2)

$C_D$	45,85	€
-------	-------	---

## PL3

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	1	2	3	4	5	
$t_1$ [mm]	10	10	10	10	10	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	2	2	2	2	2	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	$(n_r - 1) \cdot 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	
$T_{PD}$	0,54 min					

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	6	7	8	9	10	
$t_1$ [mm]	10	0	0	0	0	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	2	1	1	1	1	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	$(n_r - 1) \cdot 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	
$T_{PD}$	0,14 min					

Tuottava aika [ $T_{ND}$ ]

$r_i$	12	kpl	Porattavia rivejä
$\Sigma n_{il}$	0,60		$\Sigma(n_r - 1) \cdot 0,1$
$L$	530	mm	Kappaleen pituus
$v$	0,03	min	Kappaleen siirtymäaika kuljettimella
$T_{ND}$	9,68	min	

Materiaalikulut [poranterät]

$P_{DB}$	167,00	€	Poranterän hinta
$C_{cD}$	0,25	€/min	Kustannukset poranterästä

Porauksen kustannukset (PL3)

$C_D$	27,47	€
-------	-------	---

## PL4

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	1	2	3	4	5	
$t_1$ [mm]	15	0	0	0	0	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	1	1	1	1	1	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	$(n_r - 1) * 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	
$T_{PD}$	0,10	min				

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	6	7	8	9	10	
$t_1$ [mm]	0	0	0	0	0	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	1	1	1	1	1	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	$(n_r - 1) * 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
$T_{PD}$	0,00	min				

Tuottava aika [ $T_{ND}$ ]

$r_i$	1	kpl	Porattavia rivejä
$\Sigma n_{il}$	0,00		$\Sigma(n_r - 1) * 0,1$
$L$	420	mm	Kappaleen pituus
$v$	0,02	min	Kappaleen siirtymäaika kuljettimella
$T_{ND}$	4,67	min	

Materiaalikulut [poranterät]

$P_{DB}$	167,00	€	Poranterän hinta
$C_{cD}$	0,04	€/min	Kustannukset poranterästä

Porauksen kustannukset (PL4)

$C_D$	12,71	€
-------	-------	---



## PL5

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	1	2	3	4	5	
$t_1$ [mm]	15	15	0	0	0	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	2	2	1	1	1	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	$(n_r - 1) * 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,20	0,20	0,00	0,00	0,00	
$T_{PD}$	0,41 min					

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	6	7	8	9	10	
$t_1$ [mm]	0	0	0	0	0	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	1	1	1	1	1	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	$(n_r - 1) * 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
$T_{PD}$	0,00 min					

Tuottava aika [ $T_{ND}$ ]

$r_i$	4	kpl	Porattavia rivejä
$\Sigma n_{il}$	0,20		$\Sigma(n_r - 1) * 0,1$
$L$	560	mm	Kappaleen pituus
$v$	0,03	min	Kappaleen siirtymäaika kuljettimella
$T_{ND}$	6,08	min	

Materiaalikulut [poranterät]

$P_{DB}$	167,00	€	Poranterän hinta
$C_{cD}$	0,15	€/min	Kustannukset poranterästä

Porauksen kustannukset (PL5)

$C_D$	8,69	€
-------	------	---

## PL6

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	1	2	3	4	5	
$t_1$ [mm]	15	0	0	0	0	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	1	1	1	1	1	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	$(n_r - 1) * 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	
$T_{PD}$	0,10	min				

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	6	7	8	9	10	
$t_1$ [mm]	0	0	0	0	0	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	1	1	1	1	1	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	$(n_r - 1) * 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
$T_{PD}$	0,00	min				

Tuottava aika [ $T_{ND}$ ]

$r_i$	1	kpl	Porattavia rivejä
$\Sigma n_{il}$	0,00		$\Sigma(n_r - 1) * 0,1$
$L$	462	mm	Kappaleen pituus
$v$	0,02	min	Kappaleen siirtymäaika kuljettimella
$T_{ND}$	4,67	min	

Materiaalikulut [poranterät]

$P_{DB}$	167,00	€	Poranterän hinta
$C_{cD}$	0,04	€/min	Kustannukset poranterästä

Porauksen kustannukset (PL6)

$C_D$	6,36	€
-------	------	---

## PL7

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	1	2	3	4	5	
$t_1$ [mm]	10	10	10	10	0	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	1	1	1	1	1	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	$(n_r - 1) \cdot 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,07	0,07	0,07	0,07	0,00	
$T_{PD}$	0,27 min					

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	6	7	8	9	10	
$t_1$ [mm]	0	0	0	0	0	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	1	1	1	1	1	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	$(n_r - 1) \cdot 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
$T_{PD}$	0,00 min					

Tuottava aika [ $T_{ND}$ ]

$r_i$	4	kpl	Porattavia rivejä
$\Sigma n_{il}$	0,00		$\Sigma(n_r - 1) \cdot 0,1$
$L$	464	mm	Kappaleen pituus
$v$	0,02	min	Kappaleen siirtymäaika kuljettimella
$T_{ND}$	5,87	min	

Materiaalikulut [poranterät]

$P_{DB}$	167,00	€	Poranterän hinta
$C_{cD}$	0,10	€/min	Kustannukset poranterästä

Porauksen kustannukset (PL7)

$C_D$	32,82	€
-------	-------	---

## PL8

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	1	2	3	4	5	
$t_1$ [mm]	10	10	0	0	0	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	1	1	1	1	1	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	$(n_r - 1) \cdot 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00	
$T_{PD}$	0,14 min					

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	6	7	8	9	10	
$t_1$ [mm]	0	0	0	0	0	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	1	1	1	1	1	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	$(n_r - 1) \cdot 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
$T_{PD}$	0,00 min					

Tuottava aika [ $T_{ND}$ ]

$r_i$	2	kpl	Porattavia rivejä
$\Sigma n_{il}$	0,00		$\Sigma(n_r - 1) \cdot 0,1$
$L$	464	mm	Kappaleen pituus
$v$	0,02	min	Kappaleen siirtymäaika kuljettimella
$T_{ND}$	5,07	min	

## Materiaalikulut [poranterät]

$P_{DB}$	167,00	€	Poranterän hinta
$C_{cD}$	0,05	€/min	Kustannukset poranterästä

## Porauksen kustannukset (PL8)

$C_D$	27,75	€
-------	-------	---

## PL9

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	1	2	3	4	5	
$t_1$ [mm]	15	15	0	0	0	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	2	2	1	1	1	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	$(n_r - 1) * 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,20	0,20	0,00	0,00	0,00	
$T_{PD}$	0,41 min					

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	6	7	8	9	10	
$t_1$ [mm]	0	0	0	0	0	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	1	1	1	1	1	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	$(n_r - 1) * 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
$T_{PD}$	0,00 min					

Tuottava aika [ $T_{ND}$ ]

$r_i$	4	kpl	Porattavia rivejä
$\Sigma n_{il}$	0,20		$\Sigma(n_r - 1) * 0,1$
$L$	552	mm	Kappaleen pituus
$v$	0,03	min	Kappaleen siirtymäaika kuljettimella
$T_{ND}$	6,08	min	

## Materiaalikulut [poranterät]

$P_{DB}$	167,00	€	Poranterän hinta
$C_{cD}$	0,15	€/min	Kustannukset poranterästä

## Porauksen kustannukset (PL9)

$C_D$	8,69	€
-------	------	---

## PL11

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	1	2	3	4	5	
$t_1$ [mm]	10	10	10	10	10	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	2	2	2	2	2	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	$(n_r - 1) \cdot 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	
$T_{PD}$	0,54 min					

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	6	7	8	9	10	
$t_1$ [mm]	10	10	10	10	10	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	2	2	2	2	2	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	$(n_r - 1) \cdot 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	
$T_{PD}$	0,54 min					

Tuottava aika [ $T_{ND}$ ]

$r_i$	20	kpl	Porattavia rivejä
$\Sigma n_{il}$	1,00		$\Sigma(n_r - 1) \cdot 0,1$
$L$	1060	mm	Kappaleen pituus
$v$	0,05	min	Kappaleen siirtymäaika kuljettimella
$T_{ND}$	13,30	min	

Materiaalikulut [poranterät]

$P_{DB}$	167,00	€	Poranterän hinta
$C_{cD}$	0,40	€/min	Kustannukset poranterästä

Porauksen kustannukset (PL11)

$C_D$	37,28	€
-------	-------	---

## PL12

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	1	2	3	4	5	
$t_1$ [mm]	10	10	10	10	10	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	1	1	1	1	1	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	$(n_r - 1) \cdot 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	
$T_{PD}$	0,27 min					

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	6	7	8	9	10	
$t_1$ [mm]	10	10	10	10	10	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	1	1	1	1	1	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	$(n_r - 1) \cdot 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	
$T_{PD}$	0,27 min					

Tuottava aika [ $T_{ND}$ ]

$r_i$	10	kpl	Porattavia rivejä
$\Sigma n_{il}$	0,00		$\Sigma(n_r - 1) \cdot 0,1$
$L$	1060	mm	Kappaleen pituus
$v$	0,05	min	Kappaleen siirtymäaika kuljettimella
$T_{ND}$	8,30	min	

Materiaalikulut [poranterät]

$P_{DB}$	167,00	€	Poranterän hinta
$C_{cD}$	0,20	€/min	Kustannukset poranterästä

Porauksen kustannukset (PL12)

$C_D$	45,85	€
-------	-------	---

## PL13

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	1	2	3	4	5	
$t_1$ [mm]	10	10	10	10	10	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	2	2	2	2	2	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	$(n_r - 1) * 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	
$T_{PD}$	0,54 min					

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	6	7	8	9	10	
$t_1$ [mm]	10	0	0	0	0	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	2	1	1	1	1	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	$(n_r - 1) * 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	
$T_{PD}$	0,14 min					

Tuottava aika [ $T_{ND}$ ]

$r_i$	12	kpl	Porattavia rivejä
$\Sigma n_{il}$	0,60		$\Sigma(n_r - 1) * 0,1$
$L$	530	mm	Kappaleen pituus
$v$	0,03	min	Kappaleen siirtymäaika kuljettimella
$T_{ND}$	9,68	min	

Materiaalikulut [poranterät]

$P_{DB}$	167,00	€	Poranterän hinta
$C_{cD}$	0,25	€/min	Kustannukset poranterästä

Porauksen kustannukset (PL13)

$C_D$	27,47	€
-------	-------	---

Levyjen porausten kustannukset

$C_D$	318,23	€
-------	--------	---



## PROFIILIENTÄHTÖTIEDOT

Profiilit	P1	P2	P4	P5	P7
Profiilit	HEA300	HEA300	RHS180*6	HEA300	HEA300
h [mm]	290	290	180	290	290
b [mm]	300	300	180	300	300
tf [mm]	14	14	6	14	14
tw [mm]	8,5	8,5	6	8,5	8,5
Ah [mm <sup>2</sup> ]	2465	2465	2160	2465	2465
At [mm <sup>2</sup> ]	11250	11250	4083	11250	11250
Teräs	S355	S355	S355	S355	S355
Viiste1	0	0	1	0	0
Viiste2	0	0	1	0	0
L [mm]	8000	8000	800	8000	8000

## SAHAUS

Profiilit	P1	P2	P4	P5	P7		
T <sub>NS</sub>	4,9	4,9	6,54	4,9	4,9	min	
h (=b)	300	300	180	300	300	mm	
S	77,5	77,5	97,7	77,5	77,5	mm/min	
Sm	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	-	Materiaalikerroin
Q	8800	8800	8800	8800	8800	mm <sup>2</sup> /min	Materiaalikerroin
T <sub>PS</sub>	8,88	8,88	4,34	8,88	8,88	min	
St	6826248	6826248	5505192	6826248	6826248	mm <sup>2</sup>	
p <sub>SB</sub>	150	150	150	150	150	€/kpl	Sahanterän yksikköhinta
c <sub>CS</sub>	0,056	0,056	0,051	0,056	0,056	€/min	Sahanterän kustannukset
c <sub>si</sub>	17,21	17,21	13,36	17,21	17,21	€	

## Sahauksen kokonaiskustannus

C <sub>s</sub>	82,20	€
----------------	-------	---

## PORAUS [profiili]

Porauskutannukset on laskettu profiilille P1.

Muilla profiileilla (P2, P5, P7) rei'itys on sama eli kustannukset on kerrottu lopussa neljällä.

## P1

(ylälaippa)

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	1	2	3	4	5	
$t_1$ [mm]	14	14	14	14	14	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	2	2	2	2	2	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	$(n_r - 1) \cdot 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	
$T_{PD}$	0,76 min					

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	6	7	8	9	10	
$t_1$ [mm]	14	14	14	14	14	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	2	2	2	2	2	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	$(n_r - 1) \cdot 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	
$T_{PD}$	0,76 min					

Tuottava aika [ $T_{ND}$ ]

$r_i$	20	kpl	Porattavia rivejä
$\Sigma n_{il}$	1,00		$\Sigma(n_r - 1) \cdot 0,1$
L	530	mm	Kappaleen pituus
v	0,03	min	Kappaleen siirtymäaika kuljettimella
$T_{ND}$	13,28	min	

Materiaalikulut [poranterät]

$P_{DB}$	167,00	€	Poranterän hinta
$C_{cD}$	0,56	€/min	Kustannukset poranterästä

Porauksen kustannukset (PL12)

$C_D$	38,22	€
-------	-------	---

## P1

(alalaippa)

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	1	2	3	4	5	
$t_1$ [mm]	14	14	14	14	14	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	2	2	2	2	2	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	$(n_r - 1) * 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	
$T_{PD}$	0,76 min					

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Rivi	6	7	8	9	10	
$t_1$ [mm]	14	14	14	14	14	Levyn paksuus
$d_{il}$ [mm]	33	33	33	33	33	Porrattavan reiän halkaisija
$n_r$ [kpl]	2	2	2	2	2	Reikiä rivissä
$n_{il}$ [kpl]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	$(n_r - 1) * 0,1$
$T_{pdk}$ [min]	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	
$T_{PD}$	0,76 min					

Tuottava aika [ $T_{ND}$ ]

$r_i$	20	kpl	Porattavia rivejä
$\Sigma n_{il}$	1,00		$\Sigma(n_r - 1) * 0,1$
$L$	5000	mm	Kappaleen pituus
$v$	0,25	min	Kappaleen siirtymäaika kuljettimella
$T_{ND}$	13,50	min	

Materiaalikulut [poranterät]

$P_{DB}$	167,00	€	Poranterän hinta
$C_{cD}$	0,56	€/min	Kustannukset poranterästä

Porauksen kustannukset (P1)

$C_D$	38,81	€
-------	-------	---

Profiilien porausten kustannukset

$C_D$	308,10	€
-------	--------	---

## LOVEUS

Profiileilla P2 ja P7 on samat loveukset

P2 viiste	1	2	3	4	5	6
$t_i$ [mm]	14	14	8,5	8,5	14	14
$L_{coi}$ [mm]	300	300	232	232	300	300
$\Sigma L_{coi}$ [mm]	1664					
$T_{Pcoi}$	0,50	0,50	0,37	0,37	0,50	0,50 min
$C_{CCo}$	0,25836	0,25836	0,251623	0,251623	0,25836	0,25836 €/min
$T_{Pcoi} * C_{CCo}$	0,12919	0,12919	0,093699	0,093699	0,12919	0,12919
$n_{co}$	6	kpl				
$L$	5000	mm	Kappaleen pituus			
$T_{Nco}$	14,91	min				
$T_{Pco}$	2,74	min				

Loveuksen kustannukset

$C_{Co}$	16,25	€
----------	-------	---

## KOKOONPANO

Tuottamaton aika [ $T_{PD}$ ]

Osien lkm	10 kpl
$T_{PTak}$	1,59 min/kpl
$T_{PTa}$	15,9 min

Hitsaus	piena				puoli V			
	a mm	Lfw mm	$T_{Pfw}$ min	$C_{CPA}$ €	b mm	$L_{bw}$ mm	$T_{Pbw}$ min	$C_{CPA}$ €
PL9	8	2708	82,79	8,64	0	0	0,00	0,00
PL4	9	722	28,91	2,92	0	0	0,00	0,00
PL5	9	684	27,40	2,76	0	0	0,00	0,00
PL6	6	2092	35,38	3,75	0	0	0,00	0,00
P7	5	862	10,38	1,07	14	600	29,33	2,93
P2	5	862	10,38	1,07	14	600	29,33	2,93
$\Sigma$		7930	195,24	20,22		1200	58,67	5,86

$T_{PTa}$	15,9 min
$T_{Pfw}$	195,24 min
$T_{Pbw}$	58,67 min

Hitsauksen kustannukset

$C_{PA}$	174,32	€
----------	--------	---

Pulttaus

Liitoksessa ei ole konepajalla tehtäviä pulttauksia.

## JÄLKIKÄSITTELY JA TARKASTUKSET

$L_{PT}$	12879 mm	Levyt + Profiilit (1m matkalta)
$L_{UT}$	952 mm	(12% tarkastuslaajuus)
$L_{MT}$	144 mm	(12% tarkastuslaajuus)

Jälkikäsitteilyn ja tarkastusten kustannukset

$C_{PT}$	65,70 €
----------	---------

## MAALAUUS

Vain liitoslevyjen maalaus kustannukset huomioidaan tässä laskennassa.

Maalausjärjestelmä: EP160/3-FeSa2½ (kustannuslaskennassa)

Maalaus kustannukset

$n_f$	3 lkm	Maalikerrosten lukumäärä
A	8350420 mm <sup>2</sup>	Levyjen maalaus pinta-ala
$C_p$	36,66 €	Maalauksen kustannukset

Kuivumiskustannukset

Ei huomioida liitosten kustannusvertailussa (kummatkin ovat samat)

Maalauksen kustannukset

$C_p$	36,66 €
-------	---------

## KULJETUS

Kuljetuskustannuksia ei tutkita liitosten kustannusvertailussa.

Kuljetuksen kustannukset

$C_T$	0,00 €
-------	--------

## ASENNUS

## KIINNIKKEET:

Materiaali: pultit

(DIN933, 8.8)	kpl	€/kpl	€
M30*120	116	8,82	1023,12

Materiaali: mutterit

(DIN934-8/10)	kpl	€/kpl	€
M30*120	116	1,49	172,96

Materiaali: aluslevyt

(DIN7989)	kpl	€/kpl	€
M30*120	232	0,99	228,98

Kiinnikkeiden kokonaiskustannus

 $C_{PF1}$  1425,06 €

$n_{bi}$	116 kpl	Kiinnikkeiden lukumäärä
$T_{Ej}$	57,58 min	Kiinnittämiseen kuluva aika

$C_{LE}$	2,6 €/min	Työntekijäkustannukset
$C_{SE}$	0,5 €/min	Työmaaparakkien kiinteät kulut
$C_{EqE1}$	1,96 €/min	Nostimen vuokraus (80t)
$C_{EqE2}$	1,225 €/min	Henkilönostin (30m)

Asennuksen kokonaiskustannukset

 $C_E$  1786,95 €

## DET14: UNIVERSAALILIITOKSEN KUSTANNUSTEN YHTEENVETO

$C_{SM}$	417,65 €	Levyn materiaalien kustannus
$C_B$	2,32 €	Levyjen suihkupuhdistuksen kustannukset
$C_{CU}$	76,85 €	Levyjen leikkauskustannukset
$C_D$	318,23 €	Poraus (levyt)
$C_D$	308,10 €	Poraus (profiilit)
$C_{SM}$	82,20 €	Profiilin sahaus
$C_{CO}$	16,25 €	Profiilin loveus (ei ole lovia)
$C_{PA}$	174,32 €	Kokoonpano
$C_{PT}$	65,70 €	Jälkikäsittelyt ja tarkastukset
$C_P$	36,66 €	Maalaus kustannukset (vain levyjen maalaus)
$C_T$	0,00 €	Kuljetuskustannukset (ei huomioida liitosvertailussa)
$C_E$	1786,95 €	Asennuskustannukset (sis. Kiinnikkeiden hinnat)

$C_T$	3285,21 €	Liitoksen kustannusvaikutukset
-------	-----------	--------------------------------